

EIN INDUKTIVER MAGNETKOPF IN DÜNNFILMTECHNIK

von
Jürgen Kollmann

Erlangen 1986

1986 № 401

EIN INDUKTIVER MAGNETKOPF IN DÜNNFILMTECHNIK

Der Technischen Fakultät
der Universität Erlangen-Nürnberg

zur Erlangung des Grades

DOKTOR-INGENIEUR

vorgelegt

von

Jürgen Kollmann

Erlangen 1986

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung: 15.04.1986

Tag der Promotion: 25.06.1986

Dekan:	Prof. Dr.-Ing. H. Brand
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. D. Seitzer
	Prof. Dr. K.-H. Zschauer

EIN INDUKTIVER MAGNETKOPF IN DÜNNFILMTECHNIK

1. Einführung	1
2. Aufgabenstellung	2
3. Beschreibung des Bauelementes	3
4. Herstellung des Bauelementes	4
5. Messung der Induktivität	5
6. Zusammenfassung	6
7. Literaturverzeichnis	7
8. Anlagen	8
9. Tabellen	9
10. Zeichnungen	10
11. Ergebnisse	11
12. Diskussion	12
13. Schlussfolgerungen	13
14. Zusammenfassung	14
15. Literaturverzeichnis	15
16. Anlagen	16
17. Tabellen	17
18. Zeichnungen	18
19. Ergebnisse	19
20. Diskussion	20
21. Schlussfolgerungen	21
22. Zusammenfassung	22
23. Literaturverzeichnis	23
24. Anlagen	24
25. Tabellen	25
26. Zeichnungen	26
27. Ergebnisse	27
28. Diskussion	28
29. Schlussfolgerungen	29
30. Zusammenfassung	30
31. Literaturverzeichnis	31
32. Anlagen	32
33. Tabellen	33
34. Zeichnungen	34
35. Ergebnisse	35
36. Diskussion	36
37. Schlussfolgerungen	37
38. Zusammenfassung	38
39. Literaturverzeichnis	39
40. Anlagen	40
41. Tabellen	41
42. Zeichnungen	42
43. Ergebnisse	43
44. Diskussion	44
45. Schlussfolgerungen	45
46. Zusammenfassung	46
47. Literaturverzeichnis	47
48. Anlagen	48
49. Tabellen	49
50. Zeichnungen	50
51. Ergebnisse	51
52. Diskussion	52
53. Schlussfolgerungen	53
54. Zusammenfassung	54
55. Literaturverzeichnis	55
56. Anlagen	56
57. Tabellen	57
58. Zeichnungen	58
59. Ergebnisse	59
60. Diskussion	60
61. Schlussfolgerungen	61
62. Zusammenfassung	62
63. Literaturverzeichnis	63
64. Anlagen	64
65. Tabellen	65
66. Zeichnungen	66
67. Ergebnisse	67
68. Diskussion	68
69. Schlussfolgerungen	69
70. Zusammenfassung	70
71. Literaturverzeichnis	71
72. Anlagen	72
73. Tabellen	73
74. Zeichnungen	74
75. Ergebnisse	75
76. Diskussion	76
77. Schlussfolgerungen	77
78. Zusammenfassung	78
79. Literaturverzeichnis	79
80. Anlagen	80
81. Tabellen	81
82. Zeichnungen	82
83. Ergebnisse	83
84. Diskussion	84
85. Schlussfolgerungen	85
86. Zusammenfassung	86
87. Literaturverzeichnis	87
88. Anlagen	88
89. Tabellen	89
90. Zeichnungen	90
91. Ergebnisse	91
92. Diskussion	92
93. Schlussfolgerungen	93
94. Zusammenfassung	94
95. Literaturverzeichnis	95
96. Anlagen	96
97. Tabellen	97
98. Zeichnungen	98
99. Ergebnisse	99
100. Diskussion	100
101. Schlussfolgerungen	101
102. Zusammenfassung	102
103. Literaturverzeichnis	103
104. Anlagen	104
105. Tabellen	105
106. Zeichnungen	106
107. Ergebnisse	107
108. Diskussion	108
109. Schlussfolgerungen	109
110. Zusammenfassung	110
111. Literaturverzeichnis	111
112. Anlagen	112
113. Tabellen	113
114. Zeichnungen	114
115. Ergebnisse	115
116. Diskussion	116
117. Schlussfolgerungen	117
118. Zusammenfassung	118
119. Literaturverzeichnis	119
120. Anlagen	120
121. Tabellen	121
122. Zeichnungen	122
123. Ergebnisse	123
124. Diskussion	124
125. Schlussfolgerungen	125
126. Zusammenfassung	126
127. Literaturverzeichnis	127
128. Anlagen	128
129. Tabellen	129
130. Zeichnungen	130
131. Ergebnisse	131
132. Diskussion	132
133. Schlussfolgerungen	133
134. Zusammenfassung	134
135. Literaturverzeichnis	135
136. Anlagen	136
137. Tabellen	137
138. Zeichnungen	138
139. Ergebnisse	139
140. Diskussion	140
141. Schlussfolgerungen	141
142. Zusammenfassung	142
143. Literaturverzeichnis	143
144. Anlagen	144
145. Tabellen	145
146. Zeichnungen	146
147. Ergebnisse	147
148. Diskussion	148
149. Schlussfolgerungen	149
150. Zusammenfassung	150
151. Literaturverzeichnis	151
152. Anlagen	152
153. Tabellen	153
154. Zeichnungen	154
155. Ergebnisse	155
156. Diskussion	156
157. Schlussfolgerungen	157
158. Zusammenfassung	158
159. Literaturverzeichnis	159
160. Anlagen	160
161. Tabellen	161
162. Zeichnungen	162
163. Ergebnisse	163
164. Diskussion	164
165. Schlussfolgerungen	165
166. Zusammenfassung	166
167. Literaturverzeichnis	167
168. Anlagen	168
169. Tabellen	169
170. Zeichnungen	170
171. Ergebnisse	171
172. Diskussion	172
173. Schlussfolgerungen	173
174. Zusammenfassung	174
175. Literaturverzeichnis	175
176. Anlagen	176
177. Tabellen	177
178. Zeichnungen	178
179. Ergebnisse	179
180. Diskussion	180
181. Schlussfolgerungen	181
182. Zusammenfassung	182
183. Literaturverzeichnis	183
184. Anlagen	184
185. Tabellen	185
186. Zeichnungen	186
187. Ergebnisse	187
188. Diskussion	188
189. Schlussfolgerungen	189
190. Zusammenfassung	190
191. Literaturverzeichnis	191
192. Anlagen	192
193. Tabellen	193
194. Zeichnungen	194
195. Ergebnisse	195
196. Diskussion	196
197. Schlussfolgerungen	197
198. Zusammenfassung	198
199. Literaturverzeichnis	199
200. Anlagen	200
201. Tabellen	201
202. Zeichnungen	202
203. Ergebnisse	203
204. Diskussion	204
205. Schlussfolgerungen	205
206. Zusammenfassung	206
207. Literaturverzeichnis	207
208. Anlagen	208
209. Tabellen	209
210. Zeichnungen	210
211. Ergebnisse	211
212. Diskussion	212
213. Schlussfolgerungen	213
214. Zusammenfassung	214
215. Literaturverzeichnis	215
216. Anlagen	216
217. Tabellen	217
218. Zeichnungen	218
219. Ergebnisse	219
220. Diskussion	220
221. Schlussfolgerungen	221
222. Zusammenfassung	222
223. Literaturverzeichnis	223
224. Anlagen	224
225. Tabellen	225
226. Zeichnungen	226
227. Ergebnisse	227
228. Diskussion	228
229. Schlussfolgerungen	229
230. Zusammenfassung	230
231. Literaturverzeichnis	231
232. Anlagen	232
233. Tabellen	233
234. Zeichnungen	234
235. Ergebnisse	235
236. Diskussion	236
237. Schlussfolgerungen	237
238. Zusammenfassung	238
239. Literaturverzeichnis	239
240. Anlagen	240
241. Tabellen	241
242. Zeichnungen	242
243. Ergebnisse	243
244. Diskussion	244
245. Schlussfolgerungen	245
246. Zusammenfassung	246
247. Literaturverzeichnis	247
248. Anlagen	248
249. Tabellen	249
250. Zeichnungen	250
251. Ergebnisse	251
252. Diskussion	252
253. Schlussfolgerungen	253
254. Zusammenfassung	254
255. Literaturverzeichnis	255
256. Anlagen	256
257. Tabellen	257
258. Zeichnungen	258
259. Ergebnisse	259
260. Diskussion	260
261. Schlussfolgerungen	261
262. Zusammenfassung	262
263. Literaturverzeichnis	263
264. Anlagen	264
265. Tabellen	265
266. Zeichnungen	266
267. Ergebnisse	267
268. Diskussion	268
269. Schlussfolgerungen	269
270. Zusammenfassung	270
271. Literaturverzeichnis	271
272. Anlagen	272
273. Tabellen	273
274. Zeichnungen	274
275. Ergebnisse	275
276. Diskussion	276
277. Schlussfolgerungen	277
278. Zusammenfassung	278
279. Literaturverzeichnis	279
280. Anlagen	280
281. Tabellen	281
282. Zeichnungen	282
283. Ergebnisse	283
284. Diskussion	284
285. Schlussfolgerungen	285
286. Zusammenfassung	286
287. Literaturverzeichnis	287
288. Anlagen	288
289. Tabellen	289
290. Zeichnungen	290
291. Ergebnisse	291
292. Diskussion	292
293. Schlussfolgerungen	293
294. Zusammenfassung	294
295. Literaturverzeichnis	295
296. Anlagen	296
297. Tabellen	297
298. Zeichnungen	298
299. Ergebnisse	299
300. Diskussion	300
301. Schlussfolgerungen	301
302. Zusammenfassung	302
303. Literaturverzeichnis	303
304. Anlagen	304
305. Tabellen	305
306. Zeichnungen	306
307. Ergebnisse	307
308. Diskussion	308
309. Schlussfolgerungen	309
310. Zusammenfassung	310
311. Literaturverzeichnis	311
312. Anlagen	312
313. Tabellen	313
314. Zeichnungen	314
315. Ergebnisse	315
316. Diskussion	316
317. Schlussfolgerungen	317
318. Zusammenfassung	318
319. Literaturverzeichnis	319
320. Anlagen	320
321. Tabellen	321
322. Zeichnungen	322
323. Ergebnisse	323
324. Diskussion	324
325. Schlussfolgerungen	325
326. Zusammenfassung	326
327. Literaturverzeichnis	327
328. Anlagen	328
329. Tabellen	329
330. Zeichnungen	330
331. Ergebnisse	331
332. Diskussion	332
333. Schlussfolgerungen	333
334. Zusammenfassung	334
335. Literaturverzeichnis	335
336. Anlagen	336
337. Tabellen	337
338. Zeichnungen	338
339. Ergebnisse	339
340. Diskussion	340
341. Schlussfolgerungen	341
342. Zusammenfassung	342
343. Literaturverzeichnis	343
344. Anlagen	344
345. Tabellen	345
346. Zeichnungen	346
347. Ergebnisse	347
348. Diskussion	348
349. Schlussfolgerungen	349
350. Zusammenfassung	350
351. Literaturverzeichnis	351
352. Anlagen	352
353. Tabellen	353
354. Zeichnungen	354
355. Ergebnisse	355
356. Diskussion	356
357. Schlussfolgerungen	357
358. Zusammenfassung	358
359. Literaturverzeichnis	359
360. Anlagen	360
361. Tabellen	361
362. Zeichnungen	362
363. Ergebnisse	363
364. Diskussion	364
365. Schlussfolgerungen	365
366. Zusammenfassung	366
367. Literaturverzeichnis	367
368. Anlagen	368
369. Tabellen	369
370. Zeichnungen	370
371. Ergebnisse	371
372. Diskussion	372
373. Schlussfolgerungen	373
374. Zusammenfassung	374
375. Literaturverzeichnis	375
376. Anlagen	376
377. Tabellen	377
378. Zeichnungen	378
379. Ergebnisse	379
380. Diskussion	380
381. Schlussfolgerungen	381
382. Zusammenfassung	382
383. Literaturverzeichnis	383
384. Anlagen	384
385. Tabellen	385
386. Zeichnungen	386
387. Ergebnisse	387
388. Diskussion	388
389. Schlussfolgerungen	389
390. Zusammenfassung	390
391. Literaturverzeichnis	391
392. Anlagen	392
393. Tabellen	393
394. Zeichnungen	394
395. Ergebnisse	395
396. Diskussion	396
397. Schlussfolgerungen	397
398. Zusammenfassung	398
399. Literaturverzeichnis	399
400. Anlagen	400
401. Tabellen	401
402. Zeichnungen	402
403. Ergebnisse	403
404. Diskussion	404
405. Schlussfolgerungen	405
406. Zusammenfassung	406
407. Literaturverzeichnis	407
408. Anlagen	408
409. Tabellen	409
410. Zeichnungen	410
411. Ergebnisse	411
412. Diskussion	412
413. Schlussfolgerungen	413
414. Zusammenfassung	414
415. Literaturverzeichnis	415
416. Anlagen	416
417. Tabellen	417
418. Zeichnungen	418
419. Ergebnisse	419
420. Diskussion	420
421. Schlussfolgerungen	421
422. Zusammenfassung	422
423. Literaturverzeichnis	423
424. Anlagen	424
425. Tabellen	425
426. Zeichnungen	426
427. Ergebnisse	427
428. Diskussion	428
429. Schlussfolgerungen	429
430. Zusammenfassung	430
431. Literaturverzeichnis	431
432. Anlagen	432
433. Tabellen	433
434. Zeichnungen	434
435. Ergebnisse	435
436. Diskussion	436
437. Schlussfolgerungen	437
438. Zusammenfassung	438
439. Literaturverzeichnis	439
440. Anlagen	440
441. Tabellen	441
442. Zeichnungen	442
443. Ergebnisse	443
444. Diskussion	444
445. Schlussfolgerungen	445
446. Zusammenfassung	446
447. Literaturverzeichnis	447
448. Anlagen	448
449. Tabellen	449
450. Zeichnungen	450
451. Ergebnisse	451
452. Diskussion	452
453. Schlussfolgerungen	453
454. Zusammenfassung	454
455. Literaturverzeichnis	455
456. Anlagen	456
457. Tabellen	457
458. Zeichnungen	458
459. Ergebnisse	459
460. Diskussion	460
461. Schlussfolgerungen	461
462. Zusammenfassung	462
463. Literaturverzeichnis	463
464. Anlagen	464
465. Tabellen	465
466. Zeichnungen	466
467. Ergebnisse	467
468. Diskussion	468
469. Schlussfolgerungen	469
470. Zusammenfassung	470
471. Literaturverzeichnis	471
472. Anlagen	472
473. Tabellen	473
474. Zeichnungen	474
475. Ergebnisse	475
476. Diskussion	476
477. Schlussfolgerungen	477
478. Zusammenfassung	478
479. Literaturverzeichnis	479
480. Anlagen	480
481. Tabellen	481
482. Zeichnungen	482
483. Ergebnisse	483
484. Diskussion	484
485. Schlussfolgerungen	485
486. Zusammenfassung	486
487. Literaturverzeichnis	487
488. Anlagen	488
489. Tabellen	489
490. Zeichnungen	490
491. Ergebnisse	491
492. Diskussion	492
493. Schlussfolgerungen	493
494. Zusammenfassung	494
495. Literaturverzeichnis	495
496. Anlagen	496
497. Tabellen	497
498. Zeichnungen	498
499. Ergebnisse	499
500. Diskussion	500
501. Schlussfolgerungen	501
502. Zusammenfassung	502
503. Literaturverzeichnis	503
504. Anlagen	504
505. Tabellen	505
506. Zeichnungen	506
507. Ergebnisse	507
508. Diskussion	508
509. Schlussfolgerungen	509
510. Zusammenfassung	510
511. Literaturverzeichnis	511
512. Anlagen	512
513. Tabellen	513
514. Zeichnungen	514
515. Ergebnisse	515
516. Diskussion	516
517. Schlussfolgerungen	517
518. Zusammenfassung	518
519. Literaturverzeichnis	519
520. Anlagen	520
521. Tabellen	521
522. Zeichnungen	522
523. Ergebnisse	523
524. Diskussion	524
525. Schlussfolgerungen	525
526. Zusammenfassung	526
527. Literaturverzeichnis	527
528. Anlagen	528
529. Tabellen	529
530. Zeichnungen	530
531. Ergebnisse	531
532. Diskussion	532
533. Schlussfolgerungen	533
534. Zusammenfassung	534
535. Literaturverzeichnis	535
536. Anlagen	536
537. Tabellen	537
538. Zeichnungen	538
539. Ergebnisse	539
540. Diskussion	540
541. Schlussfolgerungen	541
542. Zusammenfassung	542
543. Literaturverzeichnis	543
544. Anlagen	544
545. Tabellen	545
546. Zeichnungen	546
547. Ergebnisse	547
548. Diskussion	548
549. Schlussfolgerungen	549
550. Zusammenfassung	550
551. Literaturverzeichnis	551
552. Anlagen	552
553	

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einführung	1
2	Magnetspeicherung	3
2.1	Magnetaufzeichnung und -wiedergabe	3
2.2	Magnetköpfe	6
2.3	Eigener Beitrag	15
3	Entwurf des Dünnfilmmagnetkopfes	19
3.1	Überlegungen zur Materialwahl und Geometrie des Kopfes	19
3.2	Theoretische Berechnungen	33
3.3	Layout des Kopfes	42
4	Herstellung des Magnetkopfes	52
4.1	Dünnschichtprozesse	52
4.1.1	Herstellung der weichmagnetischen Schichten	52
4.1.2	Herstellung der Leiterbahnen	59
4.1.3	Herstellung der Isolationsschichten	61
4.1.4	Schichtkombination und Gesamtaufbau des Kopfes	66
4.1.5	Begleitende Meßtechnik	73
4.2	Konfektionierung	84
4.2.1	Sägen, Bonden, Verkapseln	84
4.2.2	Polspiegelbearbeitung	85

5	Messungen am Dünnfilmmagnetkopf	89
5.1	Widerstand und Strombelastbarkeit	89
5.2	Induktivität und Kapazität	91
5.3	Schreib- und Leseigenschaften	100
5.3.1	Mediumloses Verfahren	100
5.3.2	Einsatz des Kopfes in einem Diskettenlaufwerk	106
6	Abschließende Betrachtungen	126
6.1	Grenzen und Verbesserungen bei der Horizontal- und Vertikalaufzeichnung mit Dünnfilm- magnetköpfen	126
6.2	Aktiver Dünnfilmkopf	139
7	Zusammenfassung	146
8	Literaturverzeichnis	149
9	Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen	157
10	Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen	159
11	Anhang	164
11.1	Maskensatz für den Dünnfilmkopf	164
11.2	Dünnschicht-Herstellungsprogramm für den Magnetkopf	166
11.3	Magnetkopfdaten	170

1 Einführung

Schon von alters her sind die Menschen bestrebt, ihre gesammelten Informationen und Erfahrungen für eine gewisse Zeit zu speichern oder sie sogar später in irgendeiner Form ihren Nachfahren bleibend zu übertragen. Als Speichermedien dienten ihnen unter anderem Tontafeln, Papyrus und bis in die heutigen Tage das Papier.

In der Neuzeit entwickelten sich neben der Fotografie und der Schallplatte auch magnetische Aufzeichnungsverfahren, die Ende der 30iger Jahre unseres Jahrhunderts zum ersten Magnetbandgerät, dem "Magnetophon", führten. Seit dieser Zeit hat diese Art der Informationsspeicherung einen ungeahnten Aufschwung erlebt. Mit dem Aufkommen der Computer mußten neben den Bandlaufwerken aus Gründen der Zugriffszeit auch Trommel- und Plattenspeicher eingeführt werden, die dasselbe magnetische Aufzeichnungsverfahren benutzen. Daß die magnetische Informationsspeicherung weiterhin hochaktuell ist, zeigt ihre Verwendung bei den Heim- und Personalcomputern in Form der Disketten und bei den Videorecordern in Form von Bändern. Auch im täglichen Leben ist sie allgegenwärtig. Man denke an Fahrkarten, Preisetikette und Scheckkarten, um nur einige Beispiele zu nennen. Einiges davon wurde erst vor kurzem neu eingeführt. So ist daher abzusehen, daß die Magnetspeichertechnik auch für die Zukunft eine bedeutende Methode zur Aufzeichnung analoger und digitaler Signale darstellen wird, wenn in den Forschungs- und Entwicklungslabors auch an anderen Verfahren (z.B. optische und magnetooptische Speicherung) intensiv gearbeitet wird. Durch ihren Einsatz auf vielen Gebieten werden natürlich verschiedene Anforderungen in Hinsicht auf Speicherdichte, Qualität, Fehlersicherheit und Preis gestellt. So wird sowohl bei der digitalen Audio- und Videoaufzeichnung, als auch in der Datenverarbeitung ein preis-

günstiges Speichern großer Datenmengen auf kleinster Fläche verlangt. In manchen Fällen ist sogar vor der eigentlichen Aufzeichnung eine Verringerung der Datenmenge durch eine sogenannte Datenreduktion möglich oder sogar nötig. Einen wesentlichen Einfluß bei einer Aufzeichnung haben das Speichermedium (Platte, Band), der Magnetkopf als Umsetzer der elektrischen in magnetische Signale bzw. umgekehrt und die Schreib-/Leseelektronik. Nachdem man mit den bisher in konventioneller Technik gefertigten Magnetköpfen bezüglich der Speicherdichte in Grenzbereiche vorgestoßen ist, verspricht der Übergang zu Dünnfilmköpfen aussichtsreiche Vorteile zu einer weiteren Steigerung der Aufzeichnungsichte.

In dieser Arbeit wird daher ein Herstellungsverfahren eines induktiven Dünnfilm-Magnetkopfes für Horizontalaufzeichnung vorgestellt, seine Eigenschaften und Kenndaten ermittelt und auf Grund dieser seine Verwendungsmöglichkeit zur Erzielung hoher Speicherdichten diskutiert.

2 Magnetspeicherung

In diesem Kapitel wird, ausgehend von einigen allgemeinen Bemerkungen zur Magnetaufzeichnung und Wiedergabe, näher auf Magnetköpfe eingegangen. Neben verschiedenen Köpfen, die teilweise in unterschiedlichen Techniken hergestellt sind, wird der Stand der Technik auf diesem Gebiet aufgezeigt und anschließend der eigene Beitrag zu diesem Thema kurz erläutert.

2.1 Magnetaufzeichnung und -wiedergabe

Unter der Magnetaufzeichnung versteht man die Umwandlung eines elektrischen Signals in eine entsprechende Magnetisierung M auf einem magnetischen Träger (Band, Platte etc.). Dies geschieht mittels eines Übertragers, gemeinhin Magnetkopf genannt, der das elektrische Signal unter idealen Voraussetzungen proportional in ein Magnetfeld umwandelt. Dieses Feld magnetisiert lokal die Schicht des bewegten Speichermediums und hinterläßt dort eine Remanenz. Bei der Wiedergabe läuft der Prozeß genau umgekehrt ab. Aus einem magnetischen Streufeld des magnetischen Trägers wird ein elektrisches Signal generiert. Als Sensor oder Übertrager dient wieder ein Magnetkopf, wobei dieser Lesekopf häufig mit dem Schreibkopf identisch ist. In der Abb. 2-1 ist dieser Prozeß noch einmal schematisch dargestellt.

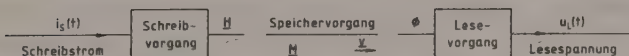


Abb. 2-1: Schema der Signalübertragung /1/

Bei der Magnetaufzeichnung unterscheidet man zwei Arten, die horizontale (longitudinale) und die senkrechte (vertikale). Während bei der ersten der Magnetisierungsvektor hauptsächlich in der Ebene, die parallel zur Speicherschichtoberfläche ist, liegt, ist bei der senkrechten Aufzeichnung die Lage dieses Vektors hauptsächlich vertikal zur Medienoberfläche ausgerichtet. Normalerweise liegt eine Mischung beider vor, wobei Speichermediumbedingt eine Art vorherrscht. Wenn im folgenden allgemein von Aufzeichnung die Rede ist, so ist dabei die bisher normalerweise verwendete longitudinale Aufzeichnung gemeint. Es würde zu weit führen, genauer auf die speziellen Aufzeichnungsverfahren, wie zum Beispiel die digitale Datenaufzeichnung, Audio- und Videoaufzeichnung, einzugehen. Hier sei auf die Literatur /1,2/ verwiesen.

Die Attraktivität der magnetischen Speichertechnik hat trotz der immensen Fortschritte in der Halbleitertechnologie an nichts verloren. Dies beruht hauptsächlich auf der Tatsache, daß es sich um ein nichtflüchtiges Speicherverfahren handelt. Darüber hinaus ermöglicht es ein preisgünstiges Speichern großer Datenmengen auf kleinster Fläche. Betrachtet man nur Magnetplatten- und Diskettenspeicher, so hat man den zusätzlichen Vorteil eines verhältnismäßig schnellen Datenzugriffs. Zum Beispiel beträgt beim longitudinalen Verfahren die Speicherdichte beim 3370-IBM-Plattenspeicher ca. 12 kBit/mm^2 /3/ und beim Seagate 5 1/4 Zoll-Winchesteraufwerk ST-512 die lineare ca. 400 Bit/mm /4/. Die mittleren Zugriffszeiten variieren dabei bis herab zu 20 ms. Diese hohen Speicherdichten sind nicht nur in der Datentechnik erwünscht, sondern mit der Digitalisierung von Audio- und Videosignalen - hierdurch soll die Ton- bzw. Bildqualität gesteigert werden - sollte auch der Verbrauch an Speichermedien gleichbleiben bzw. sogar gesenkt werden. So konnte N. Bauer bei der Aufnahme von digitalen Fernsehsignalen mit Hilfe einer semi-professionellen Bandmaschine eine lineare

Datendichte von 2200 Bit/mm erreichen /5/. Auch bei der bisher üblichen analogen Videorecordertechnik ist der Bandverbrauch verhältnismäßig gering. So wird ein komplettes Farbfernsehbild einschließlich Audiosignal auf ca. 7 mm² (System Video 2000) /6/ untergebracht. Hieraus erkennt man, daß in den letzten Jahren auf diesem Gebiet enorme Fortschritte gemacht und leistungsfähige Systeme realisiert worden sind. Dank der rasanten Entwicklung in der Halbleitertechnologie stehen schnelle Schreib- und Leseverstärker zur Verfügung, die die Signale zeitlich verarbeiten können. So ist die Datenrate beim IBM-3370-System mit 1,86 MByte/s angegeben, wobei die im Kopf induzierten Signale nur einige Mikrovolt beim Lesen betragen.

Bei diesen hohen Aufzeichnungsdichten können die bisher verwendeten konventionellen Datenträger die an sie gestellten Anforderungen nicht mehr vollständig erfüllen. So wird das γ -Fe₂O₃-Partikel-Medium langsam durch andere abgelöst, die viel besser den speziellen Anwendungsfällen angepaßt werden können. CrO₂ wird hauptsächlich bei Magnetbändern benutzt, während z.B. bei Festplatten (Harddisk) der neuesten Generation zunehmend reine Metallschichten (Fe, Co, FeCo), nach speziellen Verfahren auf den Träger aufgebracht, verwendet werden. Für die senkrechte Aufzeichnung scheint bisher die CoCr-Beschichtung die besten Aussichten auf die Einführung zu haben.

Man sieht, daß die Entwicklung bei der magnetischen Aufzeichnung nicht stehengeblieben und letztere aus Kostengründen weiterhin den Halbleiterspeichern überlegen ist. So wird der Preis zur Speicherung eines Bits in fünf Jahren bei einem dynamischen RAM immer noch viermal höher sein als bei einem magnetischen Datenträger, wie Howard C. Bogert auf dem Forum der Productronica 85 vortrug /7/.

2.2 Magnetköpfe

Bisher war nur von zwei Komponenten eines magnetischen Aufzeichnungssystems, nämlich der Schreib-/Leseelektronik und dem Medium, die Rede. Von der dritten Komponente, dem Magnetkopf, soll in dieser Arbeit ausführlich berichtet werden.

Um beim Speichermedium die gewünschte Remanenz zu erhalten, sind hohe magnetische Feldstärken, mindestens aber die Koerzitivfeldstärke H_c des betreffenden Speichermaterials, aufzubringen. Diese Feldstärken sind verhältnismäßig einfach zu erreichen. Betrachtet man dazu eine mit einem weichmagnetischen Material gefüllte Ringspule und schneidet eine dünne Scheibe (d.h. die Dicke l_g der Scheibe muß sehr klein gegenüber den anderen Abmessungen der Ringspule sein) heraus (siehe Abb. 2-2), so müssen aus Stetigkeitsgründen die Normalkomponenten der B-Felder (B_{innen} und $B_{\text{außen}}$) an der Schnittfläche gleich sein.

$$|B_i^{\perp}| = \mu_0 * \mu_r * |H_i| = \mu_0 * |H_a| = |B_a^{\perp}|$$

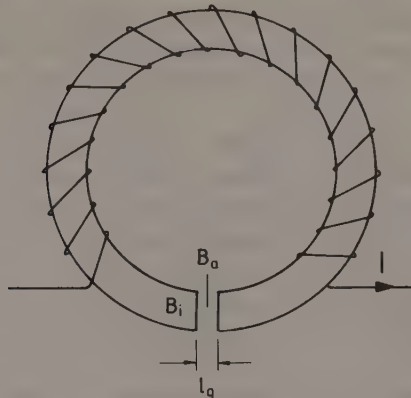


Abb. 2-2: Ringspule (Erläuterungen im Text)

Bei entsprechender Wahl des weichmagnetischen Materials mit großer relativer Permeabilität μ_r können so hohe Feldstärken $H_a = \mu_r \cdot H_i$ im Spalt entstehen. Dies ist auch das Prinzip, das bei sämtlichen induktiven Magnetköpfen angewandt wird, wobei zu bemerken ist, daß bei longitudinaler Aufzeichnung nur das Streufeld des Spaltes ausgenutzt werden kann, das natürlich betragsmäßig kleiner als das Spaltfeld ist. Dieses in der Abb. 2-3 dargestellte Streufeld beträgt nach Karlquist /2/

$$H_x(x, y) = \frac{H_g}{\pi} \cdot \left(\operatorname{arctg} \frac{1_g/2 + x}{y} + \operatorname{arctg} \frac{1_g/2 - x}{y} \right)$$

$$H_y(x, y) = - \frac{H_g}{2\pi} \cdot \ln \left(\frac{(x + 1_g/2)^2 + y^2}{(x - 1_g/2)^2 + y^2} \right) \quad (y > 0)$$

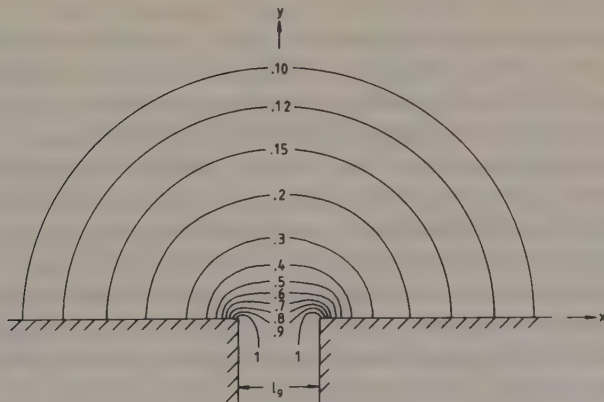


Abb. 2-3: Karlquist-Feld (dargestellt sind die Linien konstanter Feldstärke H ; l_g = Spaltlänge; Koordinatenursprung in Polspiegelebene und Spaltmitte) /2/

H_g ist dabei das Spaltfeld und l_g die Spaltlänge, die durch den Abstand der beiden Joche bestimmt wird. Diese Formel ist nicht allgemein gültig, da Voraussetzungen, wie $\mu_r \rightarrow \infty$ und Linearität, getroffen wurden. Darüberhinaus wird das Problem nur zweidimensional betrachtet. Trotzdem werden wir sie später bei qualitativen Überlegungen und Berechnungen verwenden. Durch eine spezielle Formgebung der Polschuhe kann das Streufeld optimiert werden. Deshalb haben sich entsprechend der jeweiligen Anwendung verschiedene Variationen von induktiven Magnetköpfen entwickelt, wobei die Grundform, nämlich die Ringspule mit Spalt, immer noch deutlich erkennbar ist. Andererseits kann man die Stärke des H-Feldes im Spalt und natürlich damit auch die des Streufeldes durch die Wahl des Spulenkernmaterials stark beeinflussen. Zur Magnetisierung eines Video- CrO_2 -Bandes ist z.B. eine Feldstärke $H > H_c(\text{CrO}_2) = 48 \text{ kA/m}$ erforderlich /6/. Um diese H-Werte zu erreichen, sind entsprechende Materialien mit hoher relativer Permeabilität μ_r für die Magnetjoche ($\hat{=}$ Ringkern) zu verwenden. Ein großes μ_r besitzen z.B. Nickel-Eisen-Legierungen (Ni-Fe-L.), die teilweise aus Gründen der Magnetostriktionsfreiheit noch mit geringen Zusätzen von Kupfer, Chrom, Molybdän und Mangan versetzt sind. Da es sich bei diesen Metallegierungen um verhältnismäßig gute elektrische Leiter handelt, muß man bei höheren Frequenzen Wirbelstromverluste und damit einen schlechteren Wirkungsgrad des Kopfes in Kauf nehmen. Diesem Umstand trägt man z.B. bei Audioköpfen dadurch Rechnung, daß man auch hier, wie bei Transformatoren, mehrere Bleche, die oberflächlich mit einer dünnen elektrischen Isolation versehen sind, zu einem Paket zusammenfügt. Als Legierungen werden hauptsächlich Permalloy, Mumetall, Vacoperm 100 und HyMu 80 verwendet /2,8,9,10/. Sie sind gut bearbeitbar, aber, da es sich um verhältnismäßig weiche Materialien handelt, auch nicht so verschleißfest. Daher benutzt man daraus hergestellte Köpfe vor allem bei niedrigen Mediengeschwindigkeiten für Ton- und

Datenaufzeichnung auf Magnetband.

Als andere Werkstoffe mit großer relativer Permeabilität bieten sich Ferrite (MnZn und NiZn) an, die im Sinterverfahren hergestellt werden, und deren μ_r nicht ganz so groß ist wie bei den NiFe-Legierungen. Sie bieten aber den Vorteil, daß sie einen hohen spezifischen Widerstand besitzen (NiZn: $\rho > 10^{10} \mu\Omega\text{cm}$; MnZn: $\rho > 10^4 \mu\Omega\text{cm}$), eine Lamellierung also nicht notwendig ist. Zusätzlich ist wegen ihrer relativ großen Härte ein geringerer Verschleiß als bei den NiFe-Legierungen zu erwarten. Als weiterer Werkstoff wäre noch das sehr harte Alfesil oder Sendust [2] zu erwähnen, das in den letzten Jahren in der Audio- und auch Videotechnik häufiger eingesetzt wurde.

Mit diesen "konventionellen" Köpfen wurden z.B. bei Magnetplattenspeichern Aufzeichnungsdichten von über 5 kBit/mm^2 erreicht [11]. Doch bei einer weiteren Erhöhung der Aufzeichnungsdichte ist beim Ringkopf die Verringerung der Spaltlänge eine zwingende Voraussetzung, da normalerweise die minimal erreichbare Wellenlänge größer als die Spaltlänge ist. Bei den oben erwähnten Kopferstellungsmethoden ergeben sich jedoch zunehmend Schwierigkeiten, Spaltlängen unter $1 \mu\text{m}$ vergleichsweise einfach und reproduzierbar zu realisieren. Darüberhinaus ist zu beachten, daß mit kürzeren Wellenlängen in der Regel auch eine höhere Datenübertragungsrate verbunden ist, d.h. der Magnetkopf muß mehr Flußwechsel pro Zeiteinheit erzeugen bzw. detektieren. Eine wichtige Voraussetzung für die Realisierung ist daher, daß die Resonanzfrequenz des Kopfes höher liegt als die maximale Aufzeichnungsfrequenz, wenn man einmal die analoge Aufzeichnung betrachtet. Erreichen kann man dies durch eine Verkleinerung des Kopfes, wodurch die frequenzbeeinflussenden Größen, wie Induktivität und Kapazität des Magnetkopfes, verringert werden. Bei Köpfen für Videorecorder ist man, da sie besonders dem Verschleiß ausgesetzt sind, einen speziellen Weg gegangen. Man verwendet sehr kleine Ferrit-Einkri-

stalle (Volumen: ca. $1,2 \text{ mm}^3$), deren Spalt aus einer gesputterten SiO_2 - oder Al_2O_3 -Schicht besteht /12/. Die Herstellung erfordert jedoch viel Handarbeit und mechanische Präzision.

Der Übergang zu Dünnschichtmagnetköpfen verspricht hier größere Vorteile. Die aus der Technologie integrierter Halbleiter- und Dünnschicht-Schaltungen bekannten Techniken, insbesondere die Fotolithografie und die Strukturierung, bieten gute Voraussetzungen zur wirtschaftlichen und reproduzierbaren Herstellung von Magnetköpfen mit kleinen Spaltlängen. Die Dünnschichttechnik erlaubt neben der Herstellung von induktiven auch die von magnetoresistiven Köpfen (MRH: magneto-resistive head). Hierbei wird die Änderung des elektrischen Widerstandes gewisser ferromagnetischer Legierungen (NiFe oder NiCo) unter dem Einfluß eines externen Magnetfeldes ausgenutzt. Den größten Effekt erhält man, wenn die Richtung des durch den Kopf fließenden Stromes und das externe Magnetfeld einen Winkel von ca. 45° bilden. Dies kann durch ein zusätzliches Bias-Magnetfeld (hervorgerufen durch einen Permanentmagneten oder einen stromdurchflossenen Leiter) oder aber auch durch einen sogenannten "Barber-Pole", das ist eine spezielle Anordnung von Leiterbahnstreifen auf dem magnetoresistiven Element, geschehen /13/. Die Vorteile dieses magnetoresistiven Kopfes bestehen darin, daß er mit wenigen Dünnschichtprozessen herstellbar ist, und daß der Widerstand nur von der Stärke des externen Magnetfeldes abhängt, also geschwindigkeitsunabhängig ist, wenn es z.B. von einem bewegten Datenträger (Band, Platte) hervorgerufen wird. Aber auch Nachteile besitzt ein solcher MR-Kopf. Da wäre zunächst seine Einsatzmöglichkeit nur als Lesekopf zu nennen. Des weiteren ist die Widerstandsänderung $R(H)$ nicht linear, und es entsteht ein hoher Rauschpegel, der insbesondere durch den Kontakt zwischen Kopf und Datenträger hervorgerufen wird. Neben mehreren japanischen Unternehmen, wie z.B. Sony und Canon /14,15/, arbeiten auch einige euro-

päische Firmen, wie Philips, Siemens und Bogen Electronic GmbH /16,17,18/ und auch Universitäten (Enschede, NL; Erlangen) /19,20/ auf dem Gebiet des Entwurfes bzw. der Entwicklung magneto-resistiver Köpfe bzw. Elemente.

In den letzten Jahren wurden auch Arbeiten über induktive Dünnschichtmagnetköpfe veröffentlicht. Meist beschäftigten sie sich mit theoretischen Voraussagen über deren Eigenschaften oder mit ihren Vorteilen gegenüber den bisher verwendeten Standardköpfen. Bei den Dünnschichtköpfen - wenn nicht ausdrücklich anders vermerkt, ist ab jetzt darunter ein induktiver gemeint - gibt es zwei Hauptarten (bzgl. Form):

- a) den horizontalen und
- b) den vertikalen.

Bei letzteren unterscheidet man nochmals zwischen Ein- und Mehrwindungsköpfen mit Spiral- oder gestapelter Spule. In den Abb. 2-4 bis 6 sind Skizzen dieser vier verschiedenen Typen zu sehen. Aus Sicht der Herstellung ähneln sie sich. Es werden dabei Sputter-, Aufdampf- und Galvanisierungsprozesse benutzt. Zur Strukturierung verwendet man hauptsächlich fotolithografische Verfahren, wie sie auch bei der IC-Herstellung üblich sind.

So stellten 1969 Watanabe und Matsumoto /22/ einen horizontalen Kopf mit 30 μm dicken galvanisch aufgebrachtten NiFe-Filmen her, der eine Spaltlänge von 25 μm aufwies. 1971 berichteten Kaske und Sauter /23,24/ von Horizontalköpfen mit Spaltlängen von 5 - 18 μm in 1,15 μm dicken, aufgedampften Permalloy-Schichten, und schon ein Jahr vorher zeigten Romankiw, Croll und Hatzakis /25/ einen horizontalen Dünnschichtkopf mit einer Spaltlänge von nur 2 μm bei einer Permalloy-Schichtdicke von 2,5 μm . Die geringe Spaltlänge wurde dabei durch eine Kombination eines additiven Galvanisierungsschrittes mit einer Elektronenstrahl-Maskierungstechnik erreicht. Eine weitere Verringerung der Spaltlänge ohne Verwendung von Röntgen- und Elektronenstrahlolithografieverfahren ist nicht mehr gegeben, da mit einer Größe von

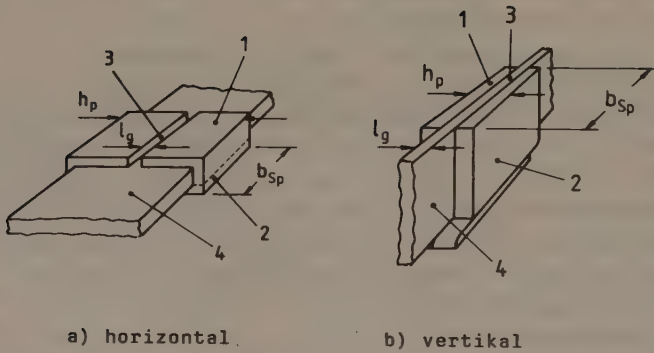


Abb. 2-4: Einwindungsköpfe in Dünnschichttechnik
(Bezeichnungen siehe Abb. 2-6) /21/

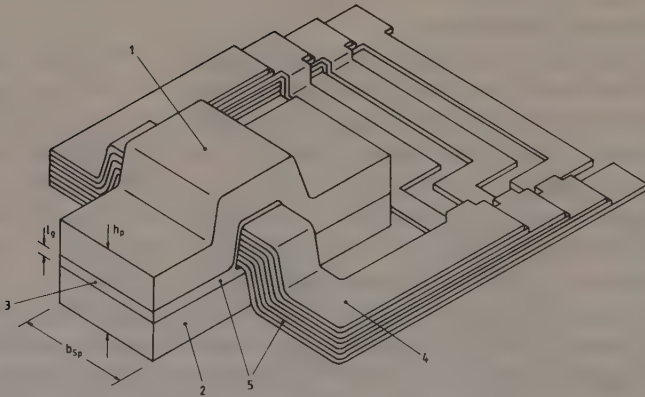


Abb. 2-5: Vertikaler Dünnschichtkopf (Mehrwindungskopf mit
"gestapelter" Spule; Bezeichnungen siehe Abb. 2-6)

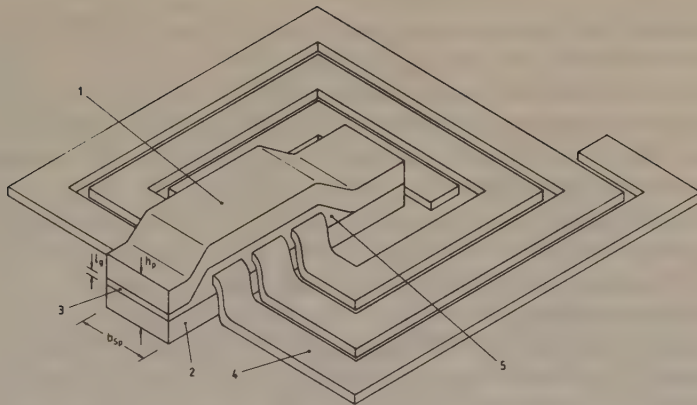


Abb. 2-6: Vertikaler Dünnschichtkopf (Mehrwindungskopf mit Flachspule;

1 oberes Magnetjoch, 2 unteres Magnetjoch,
3 Kopfspalt, 4 Leiterbahn, 5 Isolation,
6 Polspiegel, l_g Spaltlänge, b_{sp} Spurbreite,
 h_p Polstirnhöhe)

ca. $1 \mu m$ die Grenzen der Fototechnik mit normalem Licht erreicht sind. Darüber hinaus ist durch den Aufbau des horizontalen Kopfes ein hoher Verschleiß beim Betrieb gegeben. Diese Probleme mit der Spaltlänge hat man dagegen beim vertikalen Dünnschichtkopf nicht. Aus diesem Grund sind auch in den letzten Jahren keine relevanten Veröffentlichungen über horizontale Köpfe mehr erschienen. Das Gewicht hat sich zunehmend auf die vertikalen Dünnschichtköpfe verlagert.

Schon im Jahre 1970 berichteten Lazarri und Melnik /26/ als erste auf der Intermag-Konferenz in Washington von einem Vertikalkopf mit mehreren Windungen. Sie wählten zur Formgebung des Kopfes keine fotolithografischen Verfahren, sondern dampften in einem Vakuumzyklus durch mehrere Masken

magnetische, isolierende und leitende Schichten auf das Substrat. Mit einer Weiterentwicklung dieses Kopfes erreichten sie bei einer Spurbreite von ca. $110\text{ }\mu\text{m}$ eine lineare Aufzeichnungsdichte von 63 Bit/mm auf einem Magnetband /27/. Bei einer Festplatte konnten sie sogar bei einer Spurbreite von $65\text{ }\mu\text{m}$ eine Dichte von 160 Bit/mm erzeugen. Es handelte sich bei diesem Magnetkopf um einen vertikalen Mehrwindungskopf mit gestapelter Spule. Schwierig ist bei dem angewandten Beschichtungs- und gleichzeitig durchgeführten Strukturierungsverfahren die genaue Justierung der Masken in der Bedampfungsapparatur. Sehr feine Abmessungen und große Justiergenauigkeiten, wie sie heute in der Halbleitertechnologie üblich sind, können dagegen bei dem oben angegebenen Verfahren nur sehr schwer und unter großem Aufwand realisiert werden.

In den folgenden Jahren wurde in verschiedenen Veröffentlichungen der Einwindungskopf favorisiert, da bei diesem Kopftyp erstens der Herstellungsprozeß aus nur wenigen Schritten besteht und zweitens ein Mehrspurkopf verhältnismäßig einfach zu fertigen ist. Letzteres kann durch eine platzsparende Nebeneinanderordnung der einzelnen Köpfe erzielt werden. In Arbeiten von W. Chynoweth et al. /28/ und Romankiw /29/ sind solche Mehrspur-Einwindungsköpfe beschrieben. Nach Chynoweth konnten z.B. auf einer Länge von einem Millimeter vier Köpfe untergebracht werden. Eine Verkleinerung um den Faktor 5 bis 10 erscheint möglich, jedoch muß dabei beachtet werden, daß nicht nur die Fotolithografie sondern auch die Strombelastbarkeit der Leiterbahnen (Spule) einer weiteren Miniaturisierung Grenzen setzen. Zusätzlich ist zu beachten, daß der Einwindungskopf beim Lesevorgang nur eine sehr geringe induzierte Spannung abgibt, und somit beim Verstärken hinsichtlich des Kopf- und Verstärkerrauschens Probleme auftreten können. Daher wird häufig die Verwendung eines solchen Kopfes nur zum Schreiben angeregt. Das Lesen müßte dann mit Hilfe eines magnetoresistiven Ele-

mentes erfolgen. Eine solche Kombination wurde auf der Inter-mag-Konferenz 1981 in Grenoble von Kelley, Freeman et al. vorgestellt /30/. Sie hatten eine vertikale Anordnung gewählt. Der magnetisch abgeschirmte MRH liegt dabei unter dem induktiven Kopf, wobei das untere Joch gleichzeitig als magnetische Abschirmung für den magnetoresistiven Kopf dient. Auf einem Plattenlaufwerk erzielten sie mit dieser Anordnung eine Aufzeichnungsdichte von 175 Flußwechsel (FW) pro Millimeter bei einer Kopfflughöhe von 0,625 μm .

Bei den bisher aufgeführten Arbeiten handelt es sich um Laborstudien, die jedoch trotz der schon Jahre dauernden Forschungen und der zunächst aufgekommenen Euphorie lange zu keinem fertigen Produkt geführt haben. Im Jahre 1980 wurde dann von der Firma IBM ein Dünnschichtkopf vorgestellt, der im Plattenlaufwerk des 3370-Systems eingebaut ist /3/. Es handelt sich dabei um einen vertikalen induktiven Kopf mit acht Windungen, die spiralförmig in einer Ebene angeordnet sind. Die Herstellung der Metallschichten erfolgte durch galvanische Verfahren, während für die Isolationsschichten gesputtertes Aluminiumoxid im Spalt und Fotolack zwischen den beiden Magnetjochen im Bereich der Spule verwendet wurden. Die mit diesem Kopf erreichte Speicherdichte wird, wie schon früher erwähnt, mit ca. 12 kBit/mm² angegeben.

2.3 Eigener Beitrag

Wie wir bisher gesehen haben, ist für eine hochdichte Aufzeichnung auf magnetische Datenträger der Einsatz von Dünnschichtköpfen empfehlenswert. Bei den aufgeführten Arbeiten handelte es sich fast ausschließlich um Laborstudien, die jedoch nicht zu fertigen und käuflich zu erwerbenden Köpfen führten. Daher war es für Untersuchungen auf dem Gebiet der hochdichten Aufzeichnung unumgänglich, solche Dünnschichtmagnetköpfe zunächst selbst herzustellen. Darüber hinaus konnte

auch die Frage beantwortet werden, ob mit der am Lehrstuhl vorhandenen Technologie kompliziertere Strukturen, wie sie z.B. Dünnschichtköpfe darstellen, realisierbar sind.

Dazu war zunächst der Entwurf eines Kopfes erforderlich. Bewußt wurden dabei keine Einschränkungen im Hinblick auf den späteren Einsatz gemacht. So sollte es möglich sein, ihn sowohl für die digitale Aufzeichnung auf Diskette oder Festplatte als auch für die analoge Bandaufzeichnung zu verwenden. Beim Entwurf (siehe Kapitel 3) eines solchen Dünnschichtmagnetkopfes kommt es darauf an, durch eine geschickte Auswahl der zu verwendenden Materialien, deren Kombination und einer darauf abgestimmten Geometrie ein gewisses Optimum zu finden. Wie theoretische Berechnungen zur Ermittlung des Kopfspaltfeldes, der Induktivität und des Wirkungsgrades zeigen, spielen dabei neben der Permeabilität und der Sättigungsinduktion der weichmagnetischen Schichten insbesondere die Länge, die Dicke und der Abstand der beiden Magnetjoches eine bedeutende Rolle. Unter Berücksichtigung der Design-Regeln in der am Institut vorhandenen Dünnschichttechnologie führen diese Überlegungen zum Layout eines Kopfes, der zwei übereinanderliegende Flachspulen à sechs Windungen besitzt, dessen Spurbreite 50 μm und dessen Spaltlänge ca. 0,5 μm messen und der einen Platz von ca. einem Quadratmillimeter in Anspruch nimmt.

Der praktische Teil der Arbeit beginnt mit der Herstellung des Dünnschichtkopfes (siehe Kapitel 4). Hier erfolgt zunächst die Beschreibung der einzelnen Dünnschichtprozesse für die Magnetjoches, die Spule, die Isolation und deren Strukturierung. Häufig dabei auftretende Probleme, wie Haftung, mechanische Spannungen, Unterätzungen etc., werden erläutert und Lösungen aufgezeigt. Die bei der Kombination der Einzelschichten, die dann zum kompletten Aufbau des Kopfes führt, vorkommenden Schwierigkeiten wurden hauptsächlich durch Einführung von zusätzlichen Haft- bzw. Schutzschichten behoben. Mit Hilfe verschiedener Messungen werden Dicke,

Schichtqualität und magnetische Daten während der Kopferstellung überwacht, wobei unter anderem optische und magnetooptische Verfahren zur Anwendung kommen. Zum Abschluß des 4. Kapitels werden die durchgeführten Arbeiten zur Konfektionierung einschließlich der Kopfspiegelbearbeitung beschrieben. Letztere ist maßgeblich für die Funktionsfähigkeit des Magnetkopfes entscheidend, wie es verschiedene aufgeführte Verfahren gezeigt haben.

Der zweite Abschnitt im praktischen Teil der Arbeit (siehe Kapitel 5) befaßt sich mit Messungen an fertiggestellten Kopfexemplaren. Zunächst werden Kennwerte, wie Widerstand, Strombelastbarkeit, Induktivität und Kapazität des Kopfes ermittelt und diese mit theoretischen Berechnungen verglichen. So läßt sich unter anderem aus der Induktivität annähernd die Anfangspermeabilität der Magnetschichten bestimmen. Mit Hilfe zweier gegenüberliegender Köpfe, wobei der eine als Schreib- und der andere als Lesekopf dient, wird der durch die Induktion hervorgerufene gegenseitige Einfluß ermittelt und qualitativ mit der Theorie verglichen. Zur Bestimmung der Schreib- und Leseigenschaften wird der Kopf direkt in ein Experimentier-Diskettenlaufwerk eingebaut. Hier erfolgt unter verschiedenen Bedingungen, wie unterschiedliche Diskettenumdrehungszahl, Schreibfrequenz und Schreibstrom, der Test bezüglich analoger und digitaler Aufzeichnung. So ergibt sich, daß mit dem hergestellten Dünnfilmmagnetkopf beide Aufzeichnungsverfahren möglich sind und sich lineare Dichten bis zu 3000 Flußwechsel pro Millimeter bei digitaler Aufzeichnung erreichen lassen, wobei mit dem gleichen Kopf geschrieben und gelesen wird.

Zum Schluß werden in einem 6. Kapitel als Ausblick Verbesserungen hinsichtlich einer noch höheren Speicherdichte angegeben und Grenzen für die Horizontal- und Vertikalaufzeichnung aufgezeigt. Neben den Veränderungen an Kopf und Medium wird zusätzlich die Integration eines Teiles der Schreib-/Leseelektronik in monolithischer Technik direkt

neben dem Dünnsfilmmagnetkopf empfohlen. Ein dazu gemachter einfacher Schaltungsvorschlag, der mit der am Lehrstuhl vorhandenen Technologie realisierbar erscheint, beschließt das 6. Kapitel.

3 Entwurf des Dünnsfilmmagnetkopfes

Für die Realisierung funktionsfähiger elektronischer Bauelemente sind gewisse Vorüberlegungen und theoretische Berechnungen erforderlich. Die bei dem Entwurf dieses Dünnsfilmmagnetkopfes angestellten Überlegungen sind der Gegenstand dieses Kapitels. In einem ersten Teil wird die Geometrie des Kopfes einschließlich der Wahl von geeigneten Materialien behandelt. Dies führt zu einem ersten Entwurf eines Kopfes, der im zweiten Abschnitt bezüglich seines Wirkungsgrades und seiner Induktivität theoretisch berechnet und optimiert wird. Es folgt dann ein Kopf-Layout, in dem die aus den beiden vorherigen Abschnitten gewonnenen Ergebnisse bzw. Verbesserungen berücksichtigt werden.

3.1 Überlegungen zur Materialwahl und Geometrie des Kopfes

Eine Abkehr von den bisherigen, konventionell gefertigten Köpfen ist nur dann sinnvoll, wenn mit neuen Verfahren sichtbare Verbesserungen erzielt werden können. Insbesondere sind ein guter Kopfwirkungsgrad, die Einsatzfähigkeit bei großen Frequenzen und die Erreichung hoher Aufzeichnungsdichten gefragt. Von den vielen Parametern, die geändert werden könnten, ist zunächst als einer der wichtigsten die im Kopf zu verwendenden Materialien zu nennen. Als zweiter, genauso erheblicher Faktor spielt der Kopfaufbau (Geometrie, Formgebung) eine Rolle.

Bei der Entwicklung dieses Dünnsfilmkopfes wurde von dem Grundaufbau eines Ringkernkopfes ausgegangen. Er sollte aus zwei Magnetjochen bestehen, die auf einer Seite miteinander verbunden und auf der anderen durch einen dünnen Spalt voneinander getrennt sind. Diese Joche haben die Aufgabe, den magnetischen Fluß zu führen, der durch die Spule (beste-

hend aus einer oder mehreren Windungen), die zwischen den beiden Jochen liegt, hervorgerufen wird. Zur Veranschaulichung zeigt die Abbildung 3-1 einen schematischen Querschnitt durch einen Dünnfilmkopf. Hieraus ist ersichtlich, daß neben dem magnetisch und elektrisch leitfähigen auch elektrisch und magnetisch isolierendes Material erforderlich ist.

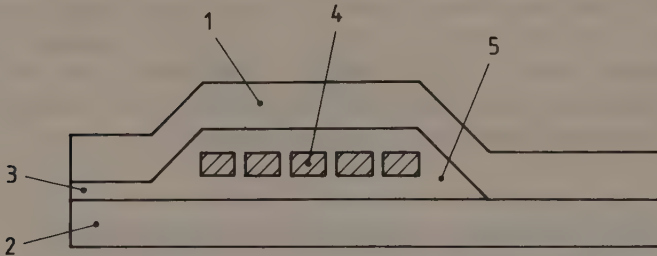


Abb. 3-1: Schematischer Querschnitt durch einen Dünnfilmkopf mit Flachspule (1 oberes Magnetjoch, 2 unteres Magnetjoch, 3 Kopfspalt, 4 Leiterbahn, 5 Isolation)

Für die Leiterbahnen kommen wegen eines niedrigen Spuleninnenwiderstandes (Verlustleistung!) nur gut leitende Werkstoffe wie Gold, Silber, Kupfer oder Aluminium in Frage. Die Schichten, die die Jochs und die Spule voneinander trennen, müssen sowohl magnetisch als auch elektrisch isolierend sein. Siliziumdioxid, Aluminiumoxid oder auch organische Materialien, wie zum Beispiel Polyimid, scheinen hier geeignet zu sein, da sie gleichzeitig einen hohen spezifischen elektrischen Widerstand ($\rho > 10^{12} \Omega \text{cm}$) und eine relative Permeabilität μ_r von ca. eins aufweisen. Darüberhinaus ist aber auch die Aufbringmöglichkeit dieser Materialien in Dünnschichttechnik zu berücksichtigen, was im

nächsten Kapitel (4. Kapitel) ausführlich behandelt werden wird.

Die Frage nach dem Magnetjochmaterial ist im Gegensatz zu den Leiterbahn- und Isolationsschichten nicht so kurz zu beantworten, da sehr viele magnetische Parameter dabei eine Rolle spielen. Es soll jedoch nicht Aufgabe dieses Kapitels sein, eine Einführung in die Grundlagen des Magnetismus zu bringen. Hierzu sei auf die einschlägige Literatur verwiesen /10,31,32/. Die nötigen Kriterien zur Auswahl des Magnetjochwerkstoffes sollen jedoch im folgenden aufgezeigt werden.

Die wichtigste Anforderung von der Anwendungsseite her ist eine möglichst verlustarme Übertragung der Information auf den Datenträger und zurück, d.h. beim Schreiben sollte ein kleiner Strom ausreichen, um das magnetische Aufzeichnungsmedium so zu magnetisieren, daß man später beim Lesen eine große Lesespannung erhält. Voraussetzung dafür ist, daß der gesamte durch die Spule hervorgerufene magnetische Fluß fast ausschließlich in den beiden Jochen (vgl. Abb. 3-1) geführt werden muß und daß die beim Ummagnetisieren des Jochmaterials durch irreversible Prozesse aufzuwendende Verlustenergie möglichst klein sein sollte. Ersteres läßt sich durch die Wahl eines hochpermeablen Werkstoffes erreichen. Eine große relative Permeabilität μ_r hat zur Folge, daß der Hauptteil des magnetischen Flusses über den Kopfspalt gelangt und dort ein genügend großes Streufeld zur Erzeugung der nötigen Remanenz auf dem Datenträger bewirkt. Magnetische Feldlinien, die nicht den in der Abb. 3-2 gezeigten Weg nehmen, müssen als Verlust angesehen werden, der den Wirkungsgrad des Kopfes herabsetzt. Ferner ist zu beachten, daß das Jochmaterial nur einen endlichen Fluß leiten kann. Die Sättigungsinduktion eines magnetischen Stoffes gibt an, welcher maximale magnetische Fluß pro Flächeneinheit zulässig ist, ohne daß Sättigungseffekte auftreten. Auch letztere bewirken eine Reduzierung der Kopfeffektivität, da nicht

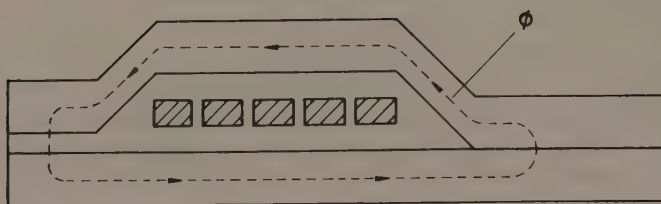


Abb. 3-2: Magnetischer Fluß ϕ im Dünnschichtkopf

mehr der theoretisch mögliche Fluß durch die Joche und damit auch nicht über den Kopfspalt gelangt (Verdrängung von Feldlinien aus dem Jochmaterial).

Ein direktes Maß für die bei einer Ummagnetisierung aufzuwendende Verlustenergie ist die von der Hystereseschleife des verwendeten Materials eingeschlossene Fläche. Drei Mechanismen tragen hauptsächlich zu den Magnetisierungsverlusten bei /10/:

- 1) Die eigentlichen Hystereseverluste, die auch bei langsamer Ummagnetisierung auftreten. Sie sind direkt mit der statischen Koerzitivfeldstärke H_c des verwendeten Materials verknüpft und steigen proportional mit der Ummagnetisierungsfrequenz an. Verursacht werden sie durch Gitterfehler und Störzentren, die die Blochwände behindern.
- 2) Die Wirbelstromverluste, die in allen leitenden Magnetwerkstoffen auftreten. Sie hängen quadratisch von der Ummagnetisierungsfrequenz und umgekehrt proportional vom spezifischen Widerstand des verwendeten magnetischen Materials ab, wie wir später noch sehen werden. Aber auch die Abmessungen der Joche spielen eine entscheidende Rolle. Liegen diese, insbesondere die Jochdicke, in der Größenordnung der Bereichsweiten der Domänen, so treten Zusatzwirbelstromverluste auf, die in ungünstigen Fällen (wenig Wände) ein Vielfaches der klassischen Wirbelstrom-

verluste ausmachen können.

- 3) Die Nachwirkungsverluste, die dann auftreten, wenn Gitterfehler (Leerstellen, Fremdatome, Versetzungen etc.) durch die Einwirkung der Magnetisierung und der Temperatur bewegt werden können.

All diese Faktoren müssen bei der Auswahl des Magnetjochmaterials beachtet werden. Hinzu kommen noch Fragen nach der Härte des Stoffes (Verschleißfestigkeit!) und deren Aufbring- und Strukturiermöglichkeiten.

Auf Grund der vielen oben erwähnten Voraussetzungen ist ein Material aus der Gruppe der weichmagnetischen ($\hat{=}$ kleine Koerzitivfeldstärke H_c) Werkstoffe zu wählen. Leider ist unter diesen Werkstoffen kein Material, das all die erwünschten Eigenschaften besitzt. Daher muß man einen Kompromiß bezüglich großer Sättigungsinduktion, hoher relativer Permeabilität, großem spezifischen Widerstand und Verschleißfestigkeit eingehen. Wenn wir insbesondere ein großes μ_r fordern, dann bieten sich Ni-Fe-Legierungen mit Nickelgehalten von ca. 80% an. Da bei diesen Legierungen die Kristallanisotropie K und die Längsmagnetostriktion λ besonders kleine Beträge erreichen, finden sich bei ihnen hohe Werte der Anfangspermeabilität μ_i und sehr niedrige Koerzitivfeldstärken wieder. Durch Zusätze von Molybdän und Kupfer kann eine Legierung erzielt werden, bei der sowohl $\lambda \approx 0$ als auch $K \approx 0$ sind. Solche Legierungen sind unter anderem Permalloy und Mumetall. So besitzt Mumetall (Ni: 77%; Mo: 4%; Cu: 5%; Rest Fe) bei Massivmaterial eine maximale relative Permeabilität von ca. 120000, eine Sättigungsflußdichte von 0,8 T und eine Koerzitivfeldstärke von etwa 1,2 A/m. Die Herstellung dünner Schichten mittels Aufdampf- oder Sputterverfahren ist bei diesen Werkstoffen, da es sich um Metalle handelt, ohne Schwierigkeiten möglich. Nachteilig erweist sich ihr kleiner spezifischer Widerstand von ca. 55 $\mu\Omega\text{cm}$ und ihre geringe Härte.

Als Alternativen bieten sich NiZn-, MnZn-Ferrit und Sen-

dust, eine Eisen-Silizium-Aluminium-Legierung an. Sie sind härter und hochohmiger als Mumetall, besitzen aber eine deutlich geringere Permeabilität und eine größere Koerzitivfeldstärke. Darüberhinaus ist die Herstellung dünner Schichten gegenüber Mumetall technologisch etwas schwieriger, da für sie nur die Katodenzerstäubung anwendbar ist und später bei der Strukturierung fast nur trockene Ätzverfahren in Frage kommen.

Für den Einsatz des Dünnschichtkopfes bei der hochdichten Aufzeichnung ist wegen der dabei normalerweise auftretenden hohen Frequenzen natürlich auch die Kenntnis über die Frequenzabhängigkeit des Werkstoffes und hier speziell die der relativen Permeabilität μ_r interessant. Dabei haben nach Boll [33] zwei Faktoren entscheidenden Einfluß auf den μ_r -Wert:

- 1) Wirbelströme
- 2) Spinrelaxation

Der zeitliche Ablauf der Magnetisierungsvorgänge wird nicht nur durch Wirbelströme, sondern auch durch die Relaxation der Elektronenspins verzögert, die ebenfalls zum Auftreten von Verlusten Anlaß gibt. Zur Berechnung wird von Boll eine komplexe relative Permeabilität

$$\bar{\mu} = \mu_{LR} - j^* \mu_{RR}$$

(μ_{LR} = Realteil, μ_{RR} = Imaginärteil) und eine neue Grenzfrequenz ω_g eingeführt, wobei der Zusammenhang zwischen beiden

$$\frac{\bar{\mu}}{\mu_i} = \frac{1}{1 + j^* \omega / \omega_g}$$

(μ_i = Anfangspermeabilität) bzw. für den uns interessierenden Realteil μ_{LR}

$$\frac{\mu_{LR}}{\mu_i} = \frac{1}{1 + \omega^2 / \omega_g^2}$$

lautet. ω_g wird hierbei auch die Halbwertsgrenzfrequenz genannt, da für $\omega = \omega_g$ die rechte Seite der letzten Gleichung 1/2 ergibt. Diese Halbwertsgrenzfrequenz beinhaltet die Werkstoffparameter, die zur Frequenzabhängigkeit beitragen. Mit $\omega = 2\pi f$ sind die Wirbelstromgrenzfrequenz f_w

$$f_w = \frac{12 * g}{d^2 * \mu_i * \mu_0}$$

(g = spez. elektr. Widerstand; d = Blechdicke) und die Spinrelaxationsgrenzfrequenz f_r

$$f_r = \frac{s * \gamma}{3 * \pi} * \frac{B_s}{\mu_i}$$

(B_s = Sättigungsinduktion; $\gamma = 1,76 * 10^{11} \text{ m}^2 / \text{Vs}^2$; $s = 0,45 \dots 1,0$) gegeben. Durch Einsetzen in die obige Formel kann für eine feste Frequenz der μ_{LR} -Wert bestimmt werden.

Während in der Abb. 3-3 nur die Wirbelströme, in der Abb. 3-4 nur die Spinrelaxation berücksichtigt wurden, sind in der Abb. 3-5 beide Einflüsse mit eingerechnet worden. Wie aus den Diagrammen zu entnehmen ist, spielt bei einer geplanten Jochdicke von $3,5 \mu\text{m}$ die von den Wirbelströmen hervorgerufene μ_i -Erniedrigung nur eine geringe Rolle. Die größten Verluste werden dagegen von der Spinrelaxation verursacht. Daher muß für hohe Frequenzen unbedingt neben einem ausreichend großen spezifischen elektrischen Widerstand auch eine hohe Sättigungsinduktion B_s des verwendeten Werk-

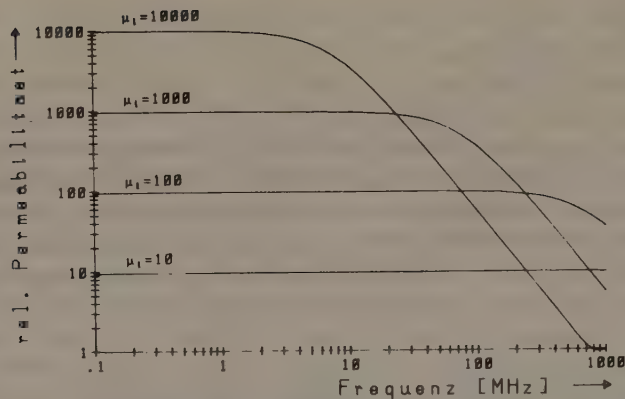


Abb. 3-3: Wirbelstromabhängigkeit der relativen Permeabilität μ_r bei Mumetal für verschiedene Anfangspermeabilitäten μ_i
(Blechdicke: 3,75 μm ; $g = 60 \mu\Omega\text{cm}$)

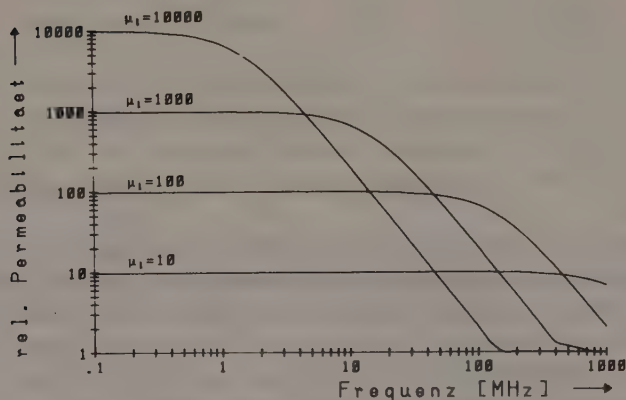


Abb. 3-4: Änderung der relativen Permeabilität μ_r bei Mumetal infolge Spinrelaxation für verschiedene Anfangspermeabilitäten μ_i ($B_s = 0,8 \text{ T}$)

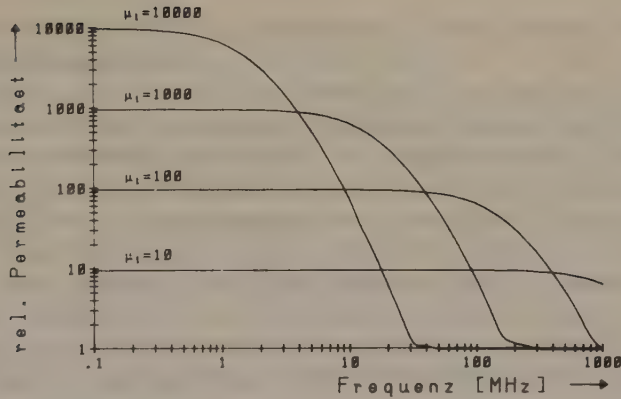


Abb. 3-5: Änderung der relativen Permeabilität μ_r infolge Spinrelaxation und Wirbelströmen bei Mumetal für verschiedene Anfangspermeabilitäten μ_i (Blechdicke: 3,75 μm ; $g = 60 \mu\Omega\text{cm}$; $B_s = 0,8 \text{ T}$)

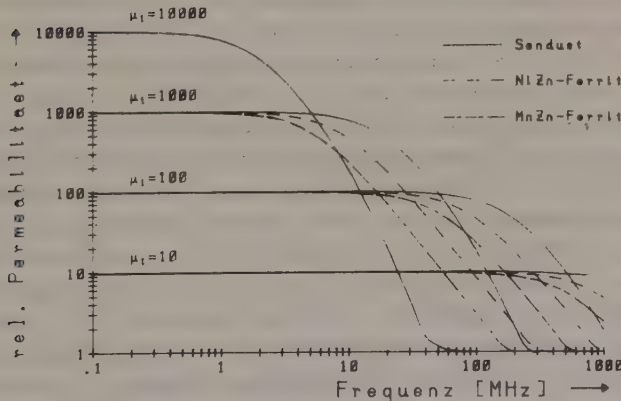


Abb. 3-6: Änderung der relativen Permeabilität μ_r infolge Spinrelaxation und Wirbelströmen bei verschiedenen Magnetjochmaterialien

stoffes gegeben sein. Zum Beispiel würde sich für Mumetall mit $B_s = 0,78 \text{ T}$ und $\mu_i = 25000$ nur eine Halbwertsfrequenz von weit weniger als 1 MHz ergeben.

Es zeigt sich jedoch, daß das μ_i nach dem Aufdampfen bzw. Sputtern niedriger liegt und damit bei den beabsichtigten Frequenzen bis 25 MHz noch ein ausreichendes $\mu_r = \mu_{LR}$ vorhanden ist. Das μ_r darf aber wiederum nicht zu klein sein, da, wie wir später noch sehen werden, die Effektivität des Kopfes mit kleiner werdender relativer Permeabilität abnimmt.

Zum Vergleich ist die Frequenzabhängigkeit von μ_r bei Sendust, NiZn- und MnZn-Ferrit in der Abb. 3-6 zusätzlich mit angegeben. Hieraus ist gut zu erkennen, daß die μ_r -Werte der Ferrite eindeutig schlechter als bei Mumetall und daß die μ_r -Werte von Sendust bei gleichem μ_i mit denen von Mumetall vergleichbar sind.

Bisher wurden nur Materialkriterien behandelt. Darüberhinaus spielt natürlich auch die Geometrie der Schichten des Kopfes für einen guten Wirkungsgrad eine bedeutende Rolle. Um eine hohe Resonanzfrequenz - diese bildet dann eine obere Schranke für den Einsatzbereich des Kopfes - zu erhalten, sollte die Induktivität des Kopfes möglichst gering sein. Dies läßt sich durch kleine Abmessungen des Joches (Menge des magnetischen Materials) realisieren und ist im Gegensatz zur Standard-Kopftechnologie mit der Dünnschichttechnik verhältnismäßig einfach möglich. Grenzen werden unter anderem durch die Wahl der Spurbreite, der Aufzeichnungsdichte und des Aufzeichnungsmediums festgelegt. Die gewünschte Spurbreite - in unserem Fall 50 μm - bestimmt die vordere laterale Ausdehnung der Magnetjoches. Die Aufzeichnungsdichte hat Auswirkungen auf die Größe der Spaltlänge, d.h. letztere muß aus physikalischen Gründen immer kleiner sein als die kürzeste Wellenlänge im Medium. Zum Beispiel kann bei einer Spaltlänge von 0,5 μm - diese wurde beim Dünnschichtkopf gewählt - und optimalen Kopf-Medium-Kontakt maximal eine

Aufzeichnungsdichte von knapp 2000 Flußwechsel pro Millimeter erreicht werden.

Für die weiteren Überlegungen und Abschätzungen müssen wir uns dem Prinzipaufbau eines induktiven Magnetkopfes zuwenden. Soll ein solcher Kopf eine Spule mit mehr als einer Windung besitzen, so bieten sich zwei Möglichkeiten der Anordnung der Spulenwicklungen an, nämlich die gestapelte Spule und die Flachspule (vgl. Abb. 2-5 und 2-6). Der Vorteil der ersten Version gegenüber der zweiten besteht in dem verhältnismäßig kleinem Platzbedarf, der zum Beispiel bei einem Mehrspurkopf wichtig ist. Weiterhin bietet ein solcher Kopf mit gestapelter Spule eine gute und gleichmäßige magnetische Kopplung zwischen den einzelnen Spulenlagen und dem Joch. Darüberhinaus sind die auftretenden parasitären magnetischen Widerstände groß, so daß die Effektivität eines solchen Kopfes ziemlich hoch liegt. Sehr nachteilig dagegen ist die technologische Realisierung, da viele Prozeßschritte für eine derartige gestapelte Spule erforderlich sind. Bei der Flachspule hingegen kommt man mit deutlich weniger Schritten aus, was mit einem erhöhten Platzbedarf und einem geringeren Wirkungsgrad erkauft werden muß.

Für die folgenden Überlegungen betrachten wir noch einmal den in der Abb. 3-1 dargestellten Kopf mit einer Flachspule. Unter der Annahme, daß die Permeabilität des Jochwerkstoffes sehr groß ($\mu_r \rightarrow \infty$) und die Spaltlänge $l_g \ll l$ (l = Länge beider Joche) ist, gilt:

$$\oint H \cdot ds = H_i \cdot l + H_a \cdot l_g = n \cdot I$$

(H_a = Magnetfeld im Spalt; H_i = Magnetfeld im Joch; n = Windungszahl; I = Spulenstrom)

Darüberhinaus wird noch angenommen, daß keine Sättigungseffekte auftreten und der komplette Fluß über den Spalt fließt, d.h. keine parasitären magnetischen Widerstände vorhanden sind. So ergibt sich mit der schon verwendeten

Beziehung $B_a^1 = B_i^1$:

$$n \cdot I = H_a \cdot (l_g + l/\mu_r)$$

Die letzte Gleichung gibt an, welcher Strom und welche Windungszahl erforderlich sind, um bei gegebener Geometrie (l und l_g) das Spaltfeld H_a zu erreichen. Auf der anderen Seite wird wegen der magnetischen Eigenschaften des Speichermediums und des Kopf-Datenträger-Abstandes ein Mindestwert von H_a verlangt, um dort eine Remanenz erzeugen zu können. Die maximal mögliche Remanenz erhalten wir bekanntlich, wenn das Magnetfeld $H > H_c/s$ ist, wobei H_c die Koerzitivfeldstärke des Mediums und s die Rechteckigkeit der Hystereseschleife des Speicherwerkstoffes bedeutet. s definiert man durch die Beziehung M_r/B_s (M_r = Remanenz; B_s = Sättigungsinduktion). Da nur das Streufeld des Kopfspalttes, das nach der Karlquist-Beziehung (vgl. Kapitel 2) kleiner als das Spaltfeld H_a ist, das Speichermaterial magnetisieren kann, muß H_a dementsprechend hoch und folglich die Windungszahl oder der Strom größer gewählt werden. Eine einfache Rechnung zur Bestimmung von I und n wollen wir im folgenden durchführen. Dazu nehmen wir als Datenträger handelsübliche Disketten (z.B. BASF-FlexyDisk), deren Magnetmaterial aus γ -Fe₂O₃ mit einem H_c von ca. 24 kA/m und einer Rechteckigkeit s von ca. 0,8 besteht. Setzen wir weiter einen kleinen Kopf-Disketten-Abstand von ca. 100 nm und eine Magnetschichtdicke von knapp 1 µm voraus, so ergibt für die Windungszahl n und den Schreibstrom I eines Kopfes mit einer Spaltlänge l_g von 0,5 µm und einer Gesamtjochlänge l von 250 µm - diese Jochlänge resultiert aus der Forderung, daß der Kopf möglichst auf einer Fläche von 0,5 mm x 0,5 mm einschließlich der Anschlußpads unterzubringen ist - das folgende Ergebnis:

$$n \cdot I = H_a \cdot (l_g + l/\mu_r) = s \cdot H_c \cdot (l_g + l/\mu_r) \cdot \frac{\pi}{2 \cdot \arctg(l_g/(2 \cdot y))} =$$

$$= 0,8 \cdot 24 \text{ kA/m} \cdot (0,5 + 250/100) \text{ } \mu\text{m} \cdot \frac{\pi}{2 \cdot \arctg(0,5/2)} = 577 \text{ mA}$$

Sättigungseffekte und ein durch parasitäre magnetische Widerstände hervorgerufener schlechterer Wirkungsgrad gehen nicht explizit in der obigen Formel ein, genauso wenig wie eine Frequenzabhängigkeit. Trotzdem wurden sie durch die Wahl einer niedrigeren Permeabilität ($\mu_r = 100$) indirekt doch berücksichtigt. Da, wie wir gesehen haben, mit zunehmender Frequenz μ_r drastisch abnimmt und der Einsatz des Kopfes im MHz-Bereich vorgesehen ist, erscheint eine solche Wahl durchaus sinnvoll.

Geht man davon aus, daß ein Schreibverstärker mit einem maximalen Ausgangsschreibstrom von 100 mA zur Verfügung steht, so sollte, um noch etwas Reserve zu besitzen, ein typischer Schreibstrom von 50 mA gewählt werden. Aus dem obigen Ergebnis folgt daher ein Kopf mit $n = 12$ Windungen. Aus Gründen des Platzbedarfes und der Dauergleichstrom-Belastbarkeitsforderung an die Leiterbahnen von mindestens 100 mA kommt eine Flachspule mit 12 Windungen nicht in Betracht. Der Kompromiß führt zu zwei Flachspulen mit je sechs Windungen, die, durch eine Isolationsschicht getrennt, aufeinanderliegen. Es handelt sich also um eine Kombination der beiden in den Abb. 2-5 und 2-6 aufgeführten Fälle.

Wie vorhin schon angesprochen, besitzt die Flachspulenversion gegenüber der gestapelten Spule mehr unerwünschte endliche magnetische Widerstände. Betrachtet man den Dünnfilmkopf in der Abb. 3-1, so erkennt man, daß durch die beiden Joche im Bereich der Spule ein Pseudospalt gebildet wird. Dieser wirkt wie ein endlicher magnetischer Widerstand, der

mit kleiner werdendem Abstand zwischen den Jochen abnimmt. Wir können uns dies in Form eines Ersatzschaltbildes (Abb. 3-7) verdeutlichen. Der totale magnetische Fluß ϕ , der durch die Spule hervorgerufen wird, erreicht dadurch nur teilweise den vorderen Spalt, d.h. der Wirkungsgrad eines Filmkopfes hängt von diesem Abstand ab. Weiter wird die Effektivität des Kopfes auch durch die Jochlänge beeinflusst. Die Wahl einer kurzen Länge hat den Vorteil, daß dadurch eine Verringerung der eben erwähnten parasitären Widerstände bewirkt wird (weniger parallel geschaltete Widerstände im Ersatzschaltbild). Damit liefern auch die letzten Windungen

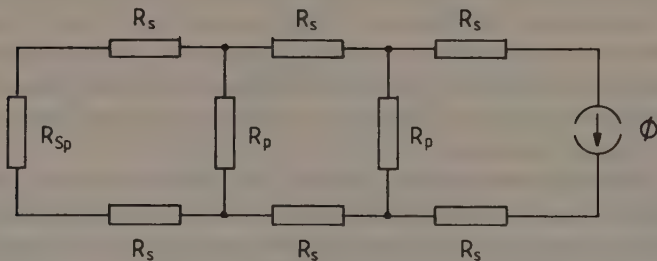


Abb. 3-7: Einfaches magnetisches Ersatzschaltbild für einen Dünnfilmkopf

(R_{Sp} = magn. Spaltwiderstand; R_s = magn. Widerstand im Joch, da μ_r endlich; R_p = parasitärer magn. Widerstand zwischen den Jochen;
 ϕ = Magnetflußquelle)

hinten am Kopf, wo das obere und das untere Joch miteinander verbunden sind, prozentual mehr Fluß bis zum Kopfspalt. Auf der anderen Seite muß aber auch genügend Platz für die Spule vorhanden sein, die ja bekanntlich zwischen den beiden Jochen liegen soll. Beiden Faktoren wurde auch hier durch die Wahl der beiden gestapelten Spiralspulen Rechnung getragen.

Daneben wird die Effektivität des Kopfes auch durch die Permeabilität und die Sättigungsinduktion des Jochmaterials bestimmt. Es ist also zu beachten, daß die Flußdichte im Magnetjoch möglichst kleiner als diese Sättigungsinduktion bleibt. Sättigung tritt nach theoretischen Berechnungen von Katz /34/ zuerst hinten am Kopf auf, und zwar dort, wo das obere und das untere Joch miteinander verbunden sind. Dies gilt aber nur dann, wenn die Jochbreite und die -dicke überall gleich groß sind. Daher ist es sinnvoll, zum Beispiel die Jochbreite hinten so groß zu wählen - die dadurch erzielte Vergrößerung der Querschnittsfläche bewirkt bei konstantem Fluß eine Verringerung der Flußdichte - , daß höchstens im Bereich des Kopfspaltes - die Jochbreite ist vorne durch die Spurbreite festgelegt - noch Sättigungseffekte auftreten können. Dementsprechend wurde ein breites Joch gewählt, das sich von hinten nach vorne zum Polspiegel des Kopfes hin verjüngt.

Die in diesem Teil des Kapitels 3.1 gewonnenen Ergebnisse, insbesondere jene, die die Geometrie betreffen, dienen als Grundlage für eine einfache theoretische und quantitative Berechnung eines Dünnfilmkopfes, die im nächsten Abschnitt erfolgen soll.

3.2 Theoretische Berechnungen

Für den Entwurf eines relativ optimalen Dünnfilmmagnetkopfes genügen die im vorausgegangenen Kapitel 3.1 angestellten Überlegungen natürlich nicht. Als festes Ergebnis können wir die beiden Flachspulen mit insgesamt 12 Windungen übernehmen. Ferner sind bei den folgenden Berechnungen die im letzten Abschnitt herausgestellten Parameter zu berücksichtigen, die die Kopfeigenschaften stark beeinflussen.

Als Grundlage für die folgenden Rechnungen dient das

"Transmission-Line"-Modell von Jones /35/, das zu Ergebnissen führt, die in analytischer Form darstellbar sind. Es handelt sich hierbei um ein zweidimensionales Modell, in denen Ausdrücke für den magnetischen Fluß in einem Dünnschichtkopf mit mehreren Windungen hergeleitet werden. Die daraus gewonnenen Gleichungen werden zur Ermittlung der Effektivität und der Induktivität in Abhängigkeit von der Geometrie und Permeabilität benutzt. Zusätzlich gehen die am Lehrstuhl gültigen Design-Regeln für die Dünnschichttechnik ein. Dabei handelt es sich um die minimal mögliche Leiterbahnbreite und den minimal möglichen Abstand zwischen zwei Leiterbahnen der gleichen oder unterschiedlicher Maskenebenen. Auch die technologischen Möglichkeiten, insbesondere solche, die die Dicke der einzelnen Schichten betreffen, müssen mitberücksichtigt werden.

Wie schon erwähnt, handelt es sich hier um ein zweidimensionales Modell, das den in der Abb. 3-8 dargestellten Querschnitt eines "idealen" Kopfes benutzt. Die wichtigsten Variablen, wie die Dicke t des Joches, die Länge l_a und l_b des Joches, die beiden Spaltlängen (g_a im Bereich der Spule und g_b beim eigentlichen Spalt), der Ort S_i der einzelnen Windungen und deren Breite δ_i und die relative Permeabilität μ_r des verwendeten Magnetwerkstoffes, sind ebenfalls dem Bild zu entnehmen. Die dritte Dimension wird nur bei der Berechnung der Induktivität - dies ist zur Ermittlung der Menge an magnetischem Material nötig - benutzt. Da es sich bei dem in der Abb. 3-8 gezeigten Kopf um ein Gebilde handelt, das in Dünnschichttechnik so gut wie nicht herstellbar ist, müssen die entsprechenden Variablen einem realistischeren Kopf angepaßt werden. Dies ist in der Abb. 3-9 geschehen. Gleichzeitig wurde dabei auch die Windungszahl von zwei mal sechs mit berücksichtigt.

Betrachten wir zunächst die Effektivität des Dünnschichtkopfes. Unter der Voraussetzung, daß sich das Randfeld in der Nähe der Polspitzen des vorderen Joches nicht ändert

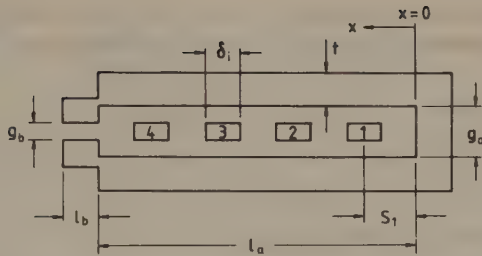


Abb. 3-8: "Jones"-Kopf (Bezeichnungen siehe Text)

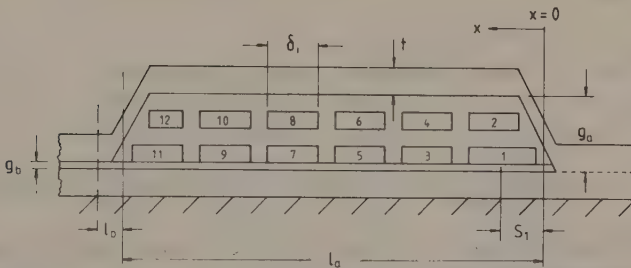


Abb. 3-9: "Realer" Dünnfilmkopf mit 12 Windungen
(Bezeichnungen siehe Text)

und daß die Abmessungen der Polspitzen und des Aufnahmespaltes fest sind, so bestimmt das Spaltfeld H_g an der Stelle $x = l_a + l_b$ die Fähigkeit des Kopfes zu schreiben. In diesem Fall wird die Effektivität E

$$E = |H_g * g_b| / (N * I)$$

(N = Windungszahl; I = Schreibstrom) zum Kriterium für die Schreibleistungsfähigkeit. Gemäß dem Reziprozitätstheorem /1/ ist die Effektivität - Sättigung ausgeschlossen - gleichzeitig ein Maß für die Lesespannung. Wendet man dies

auf unseren Mehrwindungskopf an, so trägt jede Windung mit einem gewissen Beitrag E_i zur Gesamteffektivität

$$E = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N E_i$$

bei. Dabei ist E_i gegeben durch

$$E_i = (2 * \lambda_a / (\delta_i * T_2)) * \sinh(\delta_i / (2 * \lambda_a)) * \cosh(S_i / \lambda_a)$$

mit

$$\lambda_{a/b} = \sqrt{g_{a/b} * \mu * t_{a/b} / 2}$$

und

$$T_2 = \cosh(l_a / \lambda_a) * \cosh(l_b / \lambda_b) + \frac{g_a * \lambda_b}{g_b * \lambda_a} * \sinh(l_a / \lambda_a) * \sinh(l_b / \lambda_b)$$

Wählt man für die Leiterbahnbreite δ_i einen Wert von 15 μm - in Vorversuchen hatte sich gezeigt, daß eine Kupferbahn mit einer solchen Breite und einer Dicke von ca. 2,5 μm einen Dauergleichstrom von ca. 250 mA ohne bleibenden Schaden verträgt - , so ergibt sich unter Berücksichtigung der Design-Regeln für den kleinstmöglichen Abstand zweier Strukturen mit 5 μm ein l_a von 130 μm . Mit der festen Vorgabe der Spaltlänge $g_b = 0,5 \mu\text{m}$ und der Spalttiefe $l_b = 5 \mu\text{m}$ kann man den Einfluß der übrigen drei Parameter μ_r , t und g_a auf die Effektivität ermitteln. Diese Abhängigkeiten sind in den Abbildungen 3-10a bis c dargestellt. Die Abb. 3-10a zeigt neben der mittleren Effektivität auch die Beiträge der vordersten (dem Spalt am nächsten gelegen) und der hintersten Windung. Hieraus können wir deutlich erkennen, daß durch den Flußverlust in den beiden Jochen die vorderste Windung am wirkungsvollsten ist. Für eine mittlere Effekti-

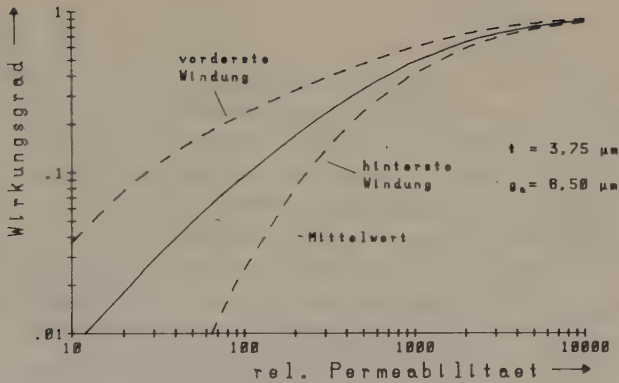


Abb. 3-10a: Abhängigkeit der Kopfeffektivität von der rel. Permeabilität μ_r (Ergebnisse aus dem Transmission-Line-Modell; übrige Parameter in Abb. 3-11c)

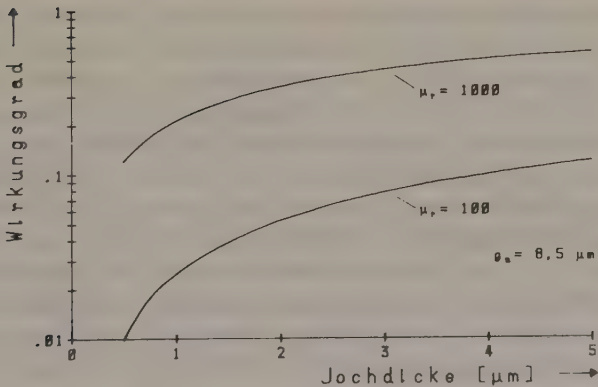


Abb. 3-10b: Abhängigkeit der Kopfeffektivität von der Jochdicke t (Ergebnisse aus dem Transmission-Line-Modell; übrige Parameter in Abb. 3-11c)

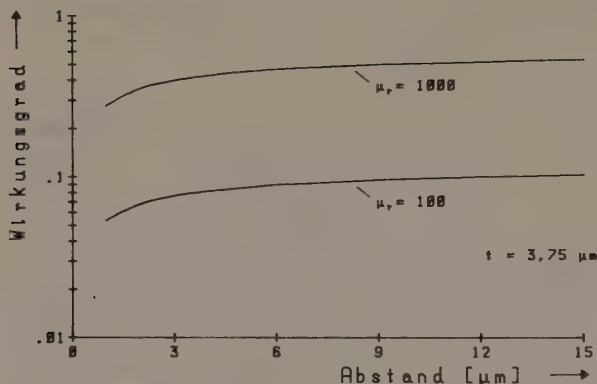


Abb. 3-10c: Abhängigkeit der Kopfeffektivität vom Jochabstand g_a (Ergebnisse aus dem Transmission-Line-Modell; übrige Parameter in Abb. 3-11c)

vität von 50% wird mindestens eine relative Permeabilität μ_r von 1000 benötigt. Den eben angesprochenen Flußverlust kann man durch eine geeignete Wahl der Jochdicke t begrenzen, wie es im Diagramm der Abb. 3-10b dargestellt ist. Der parasitäre magnetische Widerstand zwischen den beiden Magnetjochen wird durch l_a und dem Abstand g_a beeinflusst. Die Abb. 3-10c zeigt den Einfluß von g_a bei fest vorgegebenem l_a auf E.

Neben der Effektivität spielt auch die Induktivität des Kopfes eine Rolle, da sie die Resonanzfrequenz mitbestimmt. Handelsübliche Festplattenlaufwerke haben Umdrehungszahlen von ca. 3600 min^{-1} . Um auf einer Spur mit einem Radius von 90 mm eine lineare Bitdichte von 1000 mm^{-1} zu erreichen, sind Frequenzen bis zu 34 MHz erforderlich. Wegen der merklich geringeren Menge an magnetischem Material gegenüber herkömmlichen Köpfen kann man erwarten, mit der Resonanzfrequenz des Kopfes erheblich über diesem Wert zu liegen, was die folgende Abschätzung bestätigt. Konventionelle Ferrit-

köpfe besitzen nach Gatzert /11/ z.B. eine Induktivität von 6,5 μH bei 32 Windungen und einer Resonanzfrequenz von 25 MHz. Für einen Kopf mit 12 Windungen ergibt sich bei gleicher Geometrie wegen $L \sim N^2$ eine Induktivität von ca. 1 μH und damit eine Resonanzfrequenz von ca. 65 MHz. Da der entworfene Filmkopf mit Sicherheit von den Abmessungen her kleiner ist als der angegebene Ferritkopf, ist eine Induktivität von unter 1 μH und damit eine genügend hohe Resonanzfrequenz zur Erreichung einer Aufzeichnungsdichte von 1000 Flußwechsel pro Millimeter zu erwarten.

Die Induktivität eines Filmkopfes läßt sich nach Jones mit Hilfe der folgenden Formel bestimmen:

$$L = \sum_{i=1}^N \frac{1}{I \cdot \delta_i} \cdot \int_{S_i - \delta_i/2}^{S_i + \delta_i/2} \sum_{j=1}^N \phi_{ij} \cdot dx$$

wobei die ϕ_{ij} wieder Funktionen von l_a , l_b , λ_a , λ_b , g_a , g_b , μ_r , δ_i , S_i und t sind. Die Abhängigkeit von der Permeabilität μ_r , der Magnetjochdicke t und dem Jochabstand g_a sind wie bei der Effektivität wieder in drei Abbildungen (Abb. 3-11a bis c) dargestellt.

Aus diesen Diagrammen ist zu entnehmen, daß die Effektivität und Induktivität mit steigendem μ_r bzw. t anwachsen. Interessant ist ihr unterschiedliches Verhalten bei der Änderung von g_a . Dies rührt daher, daß hier zwei entgegengesetzt wirkende Effekte, die sich zudem unterschiedlich auf die Induktivität und die Effektivität auswirken, auftreten. Es sind dies die magnetische Kopplung zwischen Spule und Joch einerseits und der parasitäre magnetische Widerstand zwischen den Jochen andererseits. Letzterer spielt bei der Induktivität nur eine geringe Rolle. Daher wird der Verlauf hauptsächlich durch die magnetische Kopplung bestimmt, die bei größer werdendem g_a abnimmt und so zu einer Verringerung von L führt. Bei der Effektivität ist es genau umgekehrt,

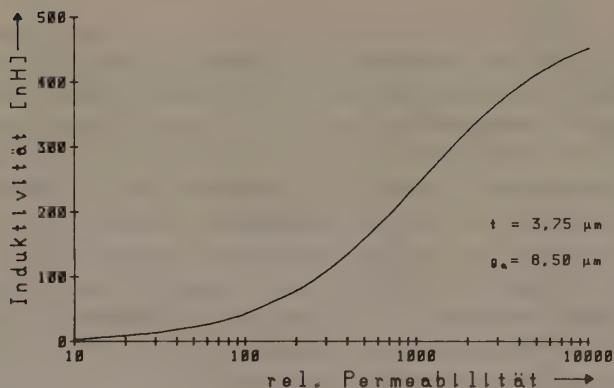


Abb. 3-11a: Abhängigkeit der Kopfinduktivität von der rel. Permeabilität μ_r (Ergebnisse aus dem Transmission-Line-Modell; übrige Parameter in Abb. 3-11c)

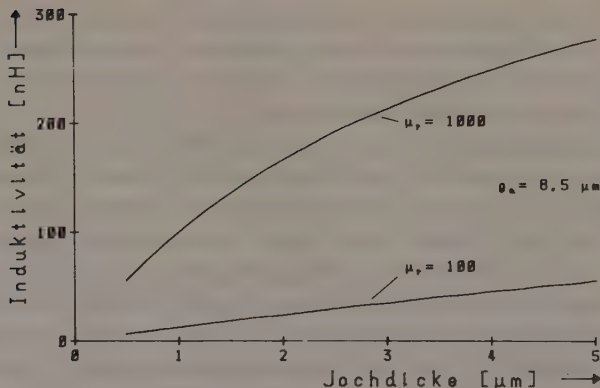


Abb. 3-11b: Abhängigkeit der Kopfinduktivität von der Jochdicke t (Ergebnisse aus dem Transmission-Line-Modell; übrige Parameter in Abb. 3-11c)

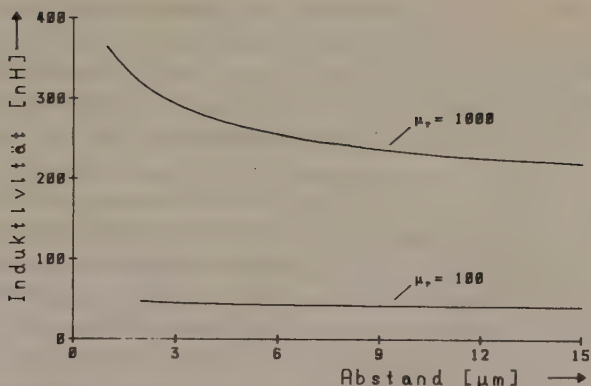


Abb. 3-11c: Abhängigkeit der Kopfinduktivität vom Jochabstand g_a (Ergebnisse aus dem Transmission-Line-Modell; Parameter: $l_a=130 \mu\text{m}$; $g_b=5 \mu\text{m}$; $S_1=17,5 \mu\text{m}$; $\delta_1=20 \mu\text{m}$; $S_2=20 \mu\text{m}$; $\delta_2=15 \mu\text{m}$; $S_{11}=117,5 \mu\text{m}$; $\delta_{11}=10 \mu\text{m}$; $S_{12}=120 \mu\text{m}$; $\delta_{12}=15 \mu\text{m}$; $i=2$ bis 5 : $S_{2i-1}=S_{2i}=i \cdot 20 \mu\text{m}$; $\delta_{2i}=\delta_{2i-1}=15 \mu\text{m}$)

d.h. die Wirkung des parasitären magnetischen Widerstandes ist größer als die magnetische Kopplung, daher die Steigerung der Effektivität E bei größer werdendem g_a .

Auf Grund der gewonnenen Erkenntnisse ist es nun möglich, mit Hilfe der Gleichung $E = |H_g \cdot g_b| / N \cdot I$ das Spaltfeld zu bestimmen. Über die Formel des Karlquistfeldes kann dann festgestellt werden, welcher Strom erforderlich ist, um bei gegebenem μ_r und bei fester Geometrie das für eine Magnetisierung des Mediums erforderliche H-Feld zu erzeugen. Für $t = 3,75 \mu\text{m}$, $g_a = 8,5 \mu\text{m}$, $\mu_r = 100$ und $I = 50 \text{ mA}$ ergibt sich ein Spaltfeld von 114 kA/m . Vergleichen wir dies Ergebnis mit den Abschätzungen zur Datenträgermagnetisierung im letzten Kapitel, so finden wir für das Spaltfeld eine gute Übereinstimmung, so daß mit Sicherheit eine Remanenz im

Speichermedium erzeugt werden kann. Es muß aber noch vermerkt werden, daß die Ergebnisse nur annähernd richtig sind, da bei der Herleitung der Gleichungen für E und L Vereinfachungen (wie z.B. keine Sättigung, kein Streufluß usw.) vorgenommen wurden. Trotzdem bietet dieses Berechnungsverfahren ein brauchbares Hilfsmittel zum Entwurf eines Magnetkopfes.

Will man jedoch eine exakte dreidimensionale Berechnung anstellen, um z.B. an jedem Ort im oder außerhalb des Joches den B-Vektor (Betrag und Richtung) zu ermitteln, so versagt das oben angegebene Verfahren. Auch Aussagen, wo Sättigung im Joch auftritt oder wie die Streuflußverteilung im Bereich des Kopfspaltes aussieht, kann die analytische Form nicht liefern. In diesen Fällen muß man numerische Verfahren benutzen, wobei die drei wichtigsten das Finite-Differenzen-Verfahren /36/, das Finite-Elemente-Verfahren /34,37/ und als drittes das Grenzflächen-Elemente-Verfahren /37/ zu erwähnen sind. Diese erfordern jedoch umfangreiche Rechnerkapazitäten und Rechenzeiten, während die Rechnung mit dem Transmission-Line-Modell ohne weiteres mit vertretbarem Zeitaufwand auf einem Tischrechner erfolgen kann.

Mit den bisher gewonnenen Erkenntnissen ist man nun in der Lage, zum Entwurf des Kopf-Layouts überzugehen, was das Thema des nächsten Abschnittes sein soll.

3.3 Layout des Kopfes

Bei dem Entwurf des Kopf-Layouts, das den Aufbau, die Geometrie und indirekt auch die Herstellung bestimmt, spielen die Design-Regeln eine wichtige Rolle. Was hat man unter letzteren zu verstehen?

Bei der Integration von Bauelementen ist man bestrebt, eine hohe Dichte zu erreichen, um möglichst viele Funktionen

auf einem Chip unterzubringen. Damit eine hohe Integrationsdichte bei vertretbarer Ausbeute erreicht wird, müssen die Dimensionen der Bauelemente auf ein Minimum reduziert werden. Diese minimalen Abmessungen und Abstände für die Bauelemente werden durch die Design-Regeln festgelegt. Es handelt sich dabei um Vorschriften, die sowohl physikalisch als auch fertigungstechnisch bedingt sind und die in zwei Klassen eingeteilt werden (siehe Abb. 3-12):

- 1) Design-Regeln innerhalb einer Maske für minimale Größe und Abstände der Bauelemente und Leiterbahnen
- 2) Design-Regeln für die Relation der verschiedenen Maskebenen zueinander. Sie geben die minimalen Überlappungen bzw. Abstände der einzelnen Ebenen an.

Im Falle des Filmkopfes galten beim Layout-Entwurf Mindestabstände, Mindestgrößen und Mindestüberlappungen von 5 μm .

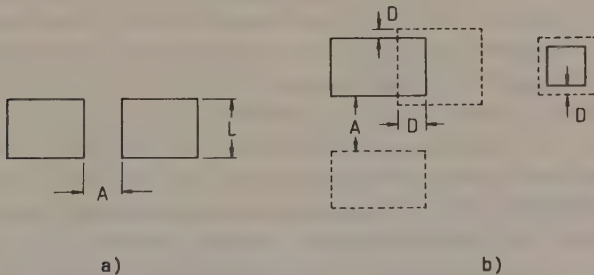


Abb. 3-12: Designregeln a) innerhalb einer Maske und
b) zwischen zwei Masken (L = Mindestgröße der
Strukturen; A = Mindestabstände der Strukturen;
 D = Mindestüberlappungen der Strukturen) /38/

Für die im Layout niedergelegte Struktur gibt es verschiedene Möglichkeiten, sie auf das später zu entstehende Bauelement zu übertragen. Die erste bezeichne ich als das "direkte" Verfahren, da schon unmittelbar bei der Herstel-

lung - z.B. Aufdampfen einer Schicht durch eine Lochmaske - die gewünschte Struktur entsteht. Bei den beiden anderen handelt es sich um fotolithografische Verfahren. Da wäre zunächst die "Lichtmethode" zu nennen. Hierbei wird das gewünschte Muster, das sich auf einer Fotomaske befindet, über einen fotografischen Schritt mit UV-Licht auf die zu strukturierende Schicht (Metall- oder Isolationsschicht) übertragen. Als dritte Möglichkeit sei noch die Elektronen- und Ionenstrahlolithografie erwähnt, die insbesondere dann angewandt werden muß, wenn die Strukturabmessungen in der gleichen Größe wie die Wellenlänge des sichtbaren Lichtes liegen oder sogar noch kleiner sind.

Im folgenden möchte ich auf das zweite Verfahren, also die Fotolithografie mit Hilfe von Fotomasken und UV-Licht, eingehen, da dieses später bei der Realisierung des Dünnfilmkopfes zur Anwendung gekommen ist. Sie ist auch die bisher übliche Methode zur Herstellung integrierter Schaltungen in der Halbleitertechnologie. Warum dazu Masken benötigt werden, soll kurz erläutert werden.

Zunächst wird auf der zu strukturierenden Schicht (z.B. Metall auf einem Keramik-Substrat) (siehe Abb. 3-13a) ein lichtempfindlicher Positiv-Lack aufgebracht und getrocknet (Abb. 3-13b). Danach legt man eine Maske mit der gewünschten Struktur auf und bringt sie in guten Kontakt mit der Oberfläche des Lackes (Abb. 3-13c). Nach der Belichtung mit UV-Licht und der anschließenden Entwicklung werden diejenigen Gebiete freigelegt (Abb. 3-13d), die später weggeätzt werden sollen (Abb. 3-13e). Wie die hierfür notwendigen Masken hergestellt werden, möchte ich im folgenden kurz erläutern.

Als erstes wird eine Vorlage in 200-facher Vergrößerung für jede Maskenebene erstellt. Wie beim Handentwurf von Leiterplatten dient hier eine lichtdurchlässige und hochpräzise Rasterfolie als Grundlage, auf der dann mit roter Klebefolie das gewünschte Muster aufgebracht wird. Nach einer 20-fachen Verkleinerung mit einer Reprokamera entsteht das sogenannte

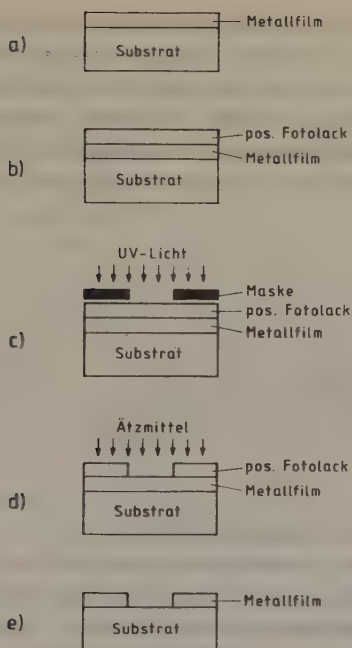


Abb. 3-13: Schematischer Ablauf bei der Schichtenstrukturierung (Fototechnik und Ätzung)
(Erklärung siehe Text)

Reticle, das im nächsten Schritt mit einer Step- und Repeat-Kamera nochmals um den Faktor 10 verkleinert und vervielfältigt wird. So entstanden in unserem Fall schließlich auf einer Fläche von 40 mm x 40 mm fast 1000 identische Strukturen. Der Maskensatz dieses Dünnfilmmagnetkopfes umfaßt acht Muttermasken, also acht Maskenebenen, von denen durch Umkopieren die Arbeitsmasken entstehen, die im späteren Herstellungsprozeß des Kopfes benutzt werden. Als Ergänzung sei noch vermerkt, daß für all diese Fotoschritte einschließlich

der Arbeitsmasken nur Emulsionsmasken verwendet wurden.

Zum Verständnis dafür, daß in unserem Fall acht Masken benötigt werden, sei auf die Abb. 3-14 verwiesen. In a) ist der aus dem letzten Kapitel bekannte Querschnitt mit den beiden aufeinanderliegenden Flachspulen und in b) eine Schichtfolge, mit der so etwas realisiert werden kann, zu

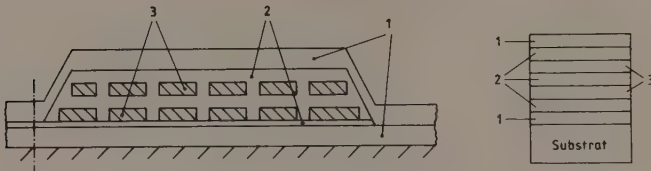


Abb. 3-14: Dünnschichtkopferstellung

links: Querschnitt durch den Kopf mit 12 Windungen; rechts: Schichtfolge zur Realisierung (1 weichmagnetische Schicht, 2 Isolationschicht, 3 Leiterbahnschicht)

sehen. In der Realität wird natürlich nach jedem Dünnschichtprozeß eine Strukturierung (Fototechnik- und Ätzschritt) durchgeführt. Die sonst teilweise erforderlichen Hilfs- und Haftschichten, die keine zusätzlichen Masken erfordern, sind zur besseren Übersicht weggelassen. Fotografien der acht Reticles sind übrigens im Anhang zu finden.

Beginnen wir zuerst mit den Masken für die untere (Maske Nr. 3) und für die obere (Maske Nr. 5) Spiralspule. Ihre Größe beeinflusst direkt die Jochlänge, die, wie wir im Abschnitt 3.2 gesehen haben, aus Gründen eines guten Wirkungsgrades möglichst klein gehalten werden sollte. Dies bedeutet, daß die sechs Windungen sehr schmal sein und dicht beieinanderliegen müssen. Die Design-Regeln verlangen einen

Mindestabstand von 5 μm , und Messungen an Teststrukturen zeigten, daß 10 - 15 μm breite und ca. 2,5 μm dicke Leiterbahnen aus Kupfer einen Dauergleichstrom von 200 mA schadlos überstehen. Damit ergibt sich unter Berücksichtigung eines Sicherheitsabstandes bzgl. der nächsten Maskenebene eine "innere" Jochlänge ($\hat{=}$ l_a im Transmission-Line-Modell) von 130 μm . Im rückwärtigen Teil des Kopfes gibt es keine Einschränkung bzgl. der Leiterbahnbreite. Hier wurden daher Breiten bis zu 25 μm gewählt, um den Spulenwiderstand möglichst gering zu halten. Bei der oberen Flachspule war es bei der vordersten Windung (vom Polspiegel aus gesehen) erforderlich, auf einer Länge von ca. 60 μm die Leiterbahnbreite auf 10 μm zu reduzieren, damit später für das obere Magnetjoch eine steile Kante an dieser Stelle vermieden wird.

Da die Flachspule spiralförmig aufgebaut ist, muß dafür gesorgt werden, daß der innere Endpunkt wieder mit einem Punkt außerhalb der Spule verbunden werden kann. Dies wäre z.B. durch einen Bonddraht möglich. Eine elegantere Methode, die in diesem Fall gewählt wurde, besteht darin, dies auch in Dünnschichttechnik und falls möglich unter Verwendung schon vorhandener Schichten zu tun. Hier ergab sich, daß man das untere Joch z.B. als Rückführung für die untere Spule und die obere Joch-Magnetschicht, letztere aber galvanisch vom oberen Joch getrennt, für die obere Spule verwenden konnte und daher keine zusätzlichen Prozeßschritte nötig waren. Wegen des höheren spezifischen Widerstandes der Ni-Fe-Legierungen ($\varrho_{\text{Mumetall}} = 60 \mu\Omega\text{cm}$) gegenüber Kupfer ($\varrho = 1,7 \mu\Omega\text{cm}$) muß die Querschnittsfläche entsprechend größer gewählt werden. Das untere Joch besitzt eine Breite von 430 μm und die obere Rückführung eine von 135 μm , wobei noch anzumerken ist, daß die Ni-Fe-Dicke um den Faktor 1,5 größer als die Stärke der Kupferleiterbahnen ist. Wie schon erwähnt, tritt beim Schreiben zuerst Sättigung im hinteren Teil des Joches auf. Um die Magnetflußdichte an

diesem Punkt zu reduzieren, wurde das obere Joch nach hinten bis auf 290 μm verbreitert. Diese Vergrößerung der Querschnittsfläche hätte man auch durch eine Verstärkung des Joches im hinteren Teil erreichen können, doch ist die technologische Realisierung etwas schwierig und wurde daher nicht durchgeführt. Dasselbe gilt auch für das untere Joch, das aus folgendem Grund noch größer in der Breite und auch Länge gewählt wurde. Wird zum Beispiel eine Schicht (in unserem Fall die Kupferleiterbahn der Spule) über eine Kante gelegt, dessen Höhe größer ist als die Dicke der Filmschicht, so verringert sich deren Querschnitt um den Faktor $\cos \theta$, wobei θ der Kantenwinkel ist. Insbesondere bei dünnen und schmalen Leiterbahnen kann dies leicht zu Unterbrechungen wegen Überbelastung beim Stromdurchgang führen. Um dies zu vermeiden, wurde das untere Joch so groß gewählt, daß die ganze Flachspule darauf Platz findet. Die dadurch etwas erhöhte Induktivität des Kopfes wurde dabei in Kauf genommen. Aus Gründen einer besseren Streufeldverteilung ist das untere Joch vorne am Polspiegel mit 70 μm etwas breiter als das obere mit 50 μm ($\hat{=}$ Spurbreite) ausgeführt. Die Spalttiefe hat zunächst bei der Herstellung auf dem Substrat einen Wert von ca. 75 μm . Dieser wird später bei der Kopfspiegelbearbeitung auf unter 10 μm reduziert.

Die Masken 2,4,6 und 8 sind sogenannte Kontaktlochmasken. Um die einzelnen Schichten miteinander verbinden zu können und um bei der späteren Konfektionierung eine Kontaktierung mittels Bonddrähte zu ermöglichen, sind isolationsfreie Stellen erforderlich, die mit Hilfe dieser Masken realisiert werden können.

Bei der späteren Polspiegelbearbeitung benötigt man Hilfen, die verhindern, daß der Kopf schräg angeschliffen oder sogar überschliffen wird. Es ist daher sinnvoll, diese Bearbeitungs- und Justierhilfen im Layout mit zu berücksichtigen. Die Abb. 3-15 zeigt in perspektivischer Darstellung diese integrierten Hilfen, die nur die für den eigentlichen

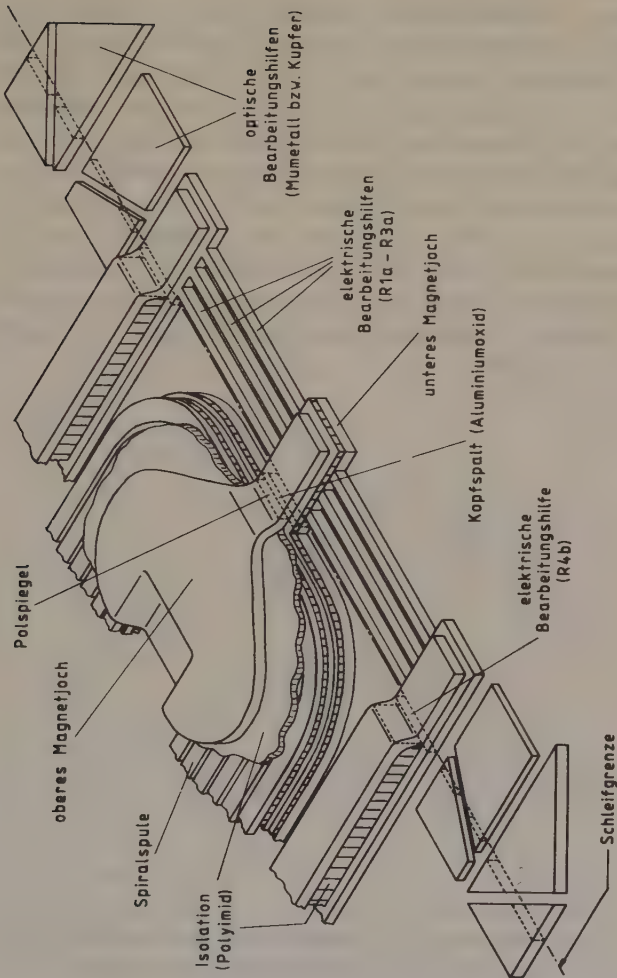


Abb. 3-15: Vorderansicht des ungeschliffenen Filmkopfes mit den verschiedenen Bearbeitungshilfen in perspektivischer Darstellung

Kopf notwendigen Schichten benutzen. Daher sind keine zusätzlichen Prozeßschritte erforderlich. Insbesondere wurden solche Schichten berücksichtigt, deren Geometrie die Kopfdaten besonders stark beeinflusst. Die Justierhilfen wurden dabei so angeordnet, daß trotz etwaiger Maskenjustierfehler der Endpunkt der Polspiegelbearbeitung ziemlich exakt festgelegt ist. Bei diesen Strukturen handelt es sich sowohl um optische als auch um elektrische Bearbeitungshilfen, wie es in der Abb. 3-15 genauer angegeben ist. Im nächsten Bild (Abb. 3-16) ist die Verschaltung der elektrischen Justierhilfen aufgeführt. Die Bearbeitung des Kopfes ist dann beendet, wenn die Widerstände R4a und R4b jeweils unendlich groß werden.

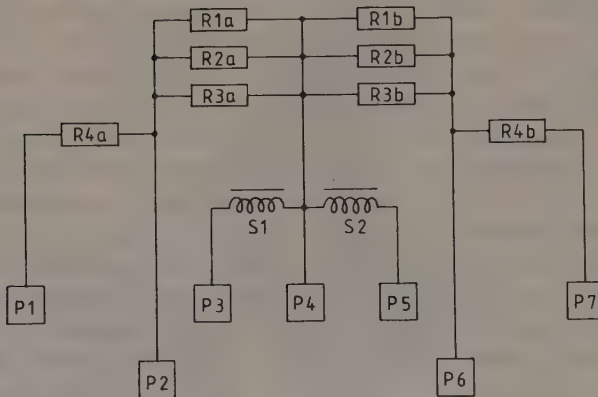


Abb. 3-16: Verschaltung der elektrischen Bearbeitungshilfen (S1 und S2 sind die beiden Spiralspulen; P1 bis P7: Bondpads; R1 bis R3: Kontrolle für das Grobschleifen; R4a und R4b geben das Schleifende an)

Während in diesem 3.Kapitel über den Entwurf des Filmkopfes einschließlich theoretischer Berechnungen und Überlegungen zur Geometrie berichtet wurde, soll im nächsten Teil die Herstellung eines solchen Dünnschichtmagnetkopfes behandelt werden.

4 Herstellung des Magnetkopfes

Während bisher nur theoretische Überlegungen angestellt wurden, soll in diesem Kapitel über den kompletten Herstellungsprozeß, angefangen vom unbehandelten Substrat bis zum fertigen Dünnfilmkopf, berichtet werden. Dabei ist zunächst die Rede von den technologischen Dünnschichtprozessen zur Herstellung von weichmagnetischen, elektrisch leitenden und isolierenden Schichten. Im weiteren wird dann die Kombination dieser Schichten, die den Kopf ergeben sollen, behandelt. Abschließend folgt noch ein Abschnitt über die Konfektionierung und die Polspiegelbearbeitung, ohne die ein Einsatz des Kopfes nicht möglich wäre.

4.1 Dünnschichtprozesse

Für die Realisierung von Dünnfilmmagnetköpfen ist die Beherrschung der Herstellung und Strukturierung einer Reihe von Magnet-, Isolations- und Leiterbahnschichten nötig. Dazu müssen die einzelnen Schichten separat hergestellt und bezüglich ihrer Güte und Strukturierbarkeit untersucht werden. Danach sind bei der geplanten Kombination der Schichten die Aufbring- und Strukturiermöglichkeiten auf Verträglichkeit zu testen. Dabei stellte sich heraus, daß Änderungen beim Material, der Schichtfolge und dem Prozeßablauf vorzunehmen waren.

4.1.1 Herstellung der weichmagnetischen Schichten

Für die beiden Joche des Magnetkopfes ist, wie schon erläutert, aus magnetischen Gründen ein weichmagnetisches Material zu wählen. Es bieten sich Nickel-Eisen-Legierungen wie Permalloy oder Mumetall an, die fast magnetostriktions-

frei sind. In unserem Fall wurden ausschließlich Mumetall und Vacoperm 100 /8/ der Firma Vacuumschmelze, Hanau verwendet.

Um gute Eigenschaften bezüglich der Haftung auf dem Substrat - meist wurden thermisch oxidierte 2"-Siliziumscheiben benutzt, da diese eine glatte und polierte Oberfläche besitzen - und dem magnetischen Verhalten zu erzielen, wurden verschiedene Aufbringverfahren, wie Verdampfen aus einem Schiffchen, Elektronenstrahlverdampfung und Kato-denzerstäubung getestet.

Beim Verdampfen aus einem Schiffchen muß in diesem speziellen Fall die Gefahr der Legierung zwischen dem Verdampfungsgut und dem Schiffchenmaterial beachtet werden. Deshalb kamen hier nur keramische Schiffchen, wie zum Beispiel leitfähiges Bornitrid oder ein indirekt geheizter Aluminiumoxid-Tiegel, in Frage. Bornitrid schied jedoch bald aus, da dessen Dampfdruck bei den zur Verdampfung des Mumetalls notwendigen Temperaturen ($> 2000^{\circ}\text{C}$) zu groß war. Dagegen konnten beim Verdampfen aus dem Al_2O_3 -Tiegel Mumetallschichten bis zu einem Mikrometer erreicht werden. War die Dicke größer als ca. $0,5\text{ }\mu\text{m}$, so lösten sich die Schichten meist wieder ab. Ursache waren mechanische Spannungen in dem Mumetallfilm, die so stark waren, daß sie wegen der guten Haftung auf dem Siliziumdioxid sogar aus dem Substrat Teile herausgerissen haben (siehe Abb. 4-1). Die geplanten Schichtstärken von 3 bis $4\text{ }\mu\text{m}$ waren mit dieser Methode nicht erreichbar, jedoch konnten einige magnetische Eigenschaften dieser Mumetallschichten bestimmt werden.

Aus Gründen einer schnellen Ummagnetisierung - Drehprozesse sind schneller als Blochwandverschiebungen - erscheint es sinnvoll, die Lage der Magnetkopfpolschuhe bezüglich der leichten und schweren Achse der Mumetallschichten auszurichten. Magnetische Messungen der Koerzitivfeldstärke H_c und der Anisotropiefeldstärke H_k zeigten an dünnen Schichten (ca. 100 nm), daß allein das Magnetfeld der Erde ausreicht,



Abb. 4-1: Die abgesprungene Mumetallschicht hat aus dem Siliziumsubstrat Scheibenoberflächenteile herausgerissen (im linken Teil der Scheibe)

eine gewisse Vorzugsrichtung bei der Bedampfung entstehen zu lassen, es aber trotzdem nötig ist, durch ein externes zusätzliches Magnetfeld (parallel zur Substratoberfläche) die Richtung genau und definiert einzustellen. Da wegen der beengten Platzverhältnisse ein Einbau einer Magnetspule in der bis dahin verwendeten Bedampfungsanlage nicht möglich war, um ein solch definiertes Magnetfeld zu erhalten, wurden die folgenden Experimente in einer größeren Anlage, die mit einer Elektronenstrahlkanone und einem Helmholtz-Spulenpaar ausgerüstet war, fortgeführt. Bis zu vier 2" Si-Wafer konnten in einem Magnetfeld von 4 kA/m mit Mumetall auf einmal bedampft werden. Oxidierte Siliziumscheiben mit Mumetallstärken von ca. 150 nm zeigten ausreichende Haftung, Koerzitivfeldstärken von 0,25 bis 0,28 kA/m und Anisotropiefeldstärken von 0,3 bis 0,4 kA/m. Mit zunehmender Dicke der Mumetallschicht verschlechterten sich jedoch diese Werte rapide.

So zeigten dicke Filme ($> 500 \text{ nm}$), sofern sie auf dem Wafer hielten, H_C -Werte von 1,6 bis 3,2 kA/m. Diese hohen Werte sind auf mechanische Spannungen in der Mumetallschicht zurückzuführen (Magnetostriktion), die auch die Ablösung der Schichten bewirkt haben. Die Haftung zwischen Mumetall und dem Substrat (thermisch oxidierte Siliziumscheibe) war hervorragend, da auch hier wieder bei dicken Schichten Teile aus dem Substrat herausgerissen wurden.

Um diese Spannungen zu reduzieren, wurde eine Lamellierungstechnik angewandt, d.h. durch abwechselndes Aufdampfen von Mumetall und Siliziumdioxid mit Hilfe der Elektronenstrahlkanone wurde versucht, die Schichten "elastischer" zu machen. Die Dicke der einzelnen Schichten betrug bei Mumetall ca. 100 nm und bei Siliziumdioxid ca. 50 nm. Ein Schichtpaket von fünf Mumetall- und vier Siliziumdioxidlagen zeigte keinerlei Ablösungserscheinungen, und die erzielten magnetischen Daten (H_C : ca. 0,28 kA/m; H_k : ca. 0,4 kA/m) waren mit denen einer einzelnen dünnen Mumetallschicht weitgehend identisch. Bei mehr als sechs Mumetallagen traten jedoch die gleichen Probleme wie bei den dicken massiven Schichten auf. Die Verwendung von Aluminiumoxid statt Siliziumdioxid als Zwischenschicht und Saphir- statt oxidierte Siliziumscheiben brachte keine Verbesserung. Auch ein Heizen der Wafer während der Bedampfung zeigte bis zu 200°C kein günstigeres Verhalten bezüglich der mechanischen Spannungen und der magnetischen Werte. Über 250°C aufgeheizte Substrate wiesen nach der Bedampfung etwas geringere H_C -Werte auf, und die Spannungen waren leicht vermindert.

Aus diesen Ergebnissen muß man den Schluß ziehen, daß es wenig sinnvoll ist, dicke Mumetallschichten mit guten magnetischen ($H_C < 80 \text{ A/m}$) und relativ spannungsfreien Eigenschaften mittels Bedampfung herzustellen. Die Ursache hierfür liegt mit großer Wahrscheinlichkeit daran, daß beim Verdampfen wegen der unterschiedlichen Dampfdrücke der Legierungsbestandteile die Schichtzusammensetzung von der des

Ausgangsmaterials abweicht, und somit die vorher vorhandene Magnetostriktionsfreiheit nicht mehr vorhanden ist. Vermeiden kann man dieses Problem, indem man z.B. auf das Flash- verdampfungs- oder das Katodenzerstäubungsverfahren übergeht. Die hierzu nötigen Geräte standen zu Beginn der Untersuchungen jedoch nicht zur Verfügung. Daher wurden zunächst die Verdampfungsversuche durchgeführt.

Zur Anwendung kam schließlich das Katodenzerstäubungsverfahren. Benutzt wurde dabei eine Sputteranlage vom Typ SPUTRON II (Balzers). Trotz der verhältnismäßig niedrigen Sputterraten von ca. 17 nm/min bei Mumetall ist die Anlage für eine weitgehend spannungsfreie Herstellung weichmagnetischer Schichten gut geeignet. So konnten "massive" Mumetallfilme bis zu 4 μm Dicke gesputtert werden, ohne daß nach der Entnahme aus der Katodenzerstäubungsanlage und später bei der Strukturierung Ablösungserscheinungen beobachtet wurden. Ein zusätzliches Magnetfeld zur Ausrichtung der Mumetallschichten war nicht erforderlich, da die Ringspule des SPUTRONS, die das "Zerfließen" des Plasmastrahls verhindert, so angeordnet ist, daß das durch sie erzeugte Magnetfeld - es beträgt am Ort der Substrate ca. 5,5 kA/m - die leichte und schwere Achse ausreichend festlegt (siehe dazu Abb. 4-2). Dabei liegt die leichte Achse in der Ebene der Substratoberfläche und in der Polfläche parallel zu den Spaltkanten des Kopfes. Weiter ist durch die Konstruktion der Anlage eine geringe thermische Belastung der Substrate - sie liegen weit außerhalb des Plasmas - gewährleistet, so daß keine Substratkühlung erforderlich ist. Die magnetischen Kennwerte einer 3,5 μm dicken Mumetallschicht betrugen für H_c weniger als 80 A/m und für H_k ca. 0,8 kA/m und entsprachen den geforderten Daten, so daß man das Sputterverfahren für die Herstellung dicker weichmagnetischer Schichten als geeignet bezeichnen darf.

Da nicht durch Lochmasken das Mumetall auf die Substrate gesputtert wurde, mußten die Jochstrukturen nachträglich mit

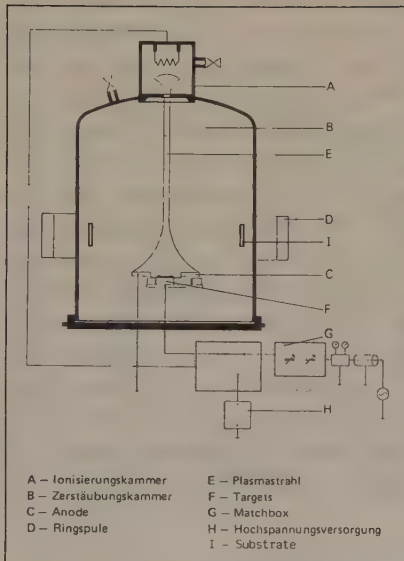


Abb. 4-2:

Querschnitt durch das
DC/RF-SPUTRON von
Balzers

Hilfe der Fotolithografie hergestellt werden. Für das Ätzen boten sich sowohl trockene als auch naßchemische Verfahren an. Als Ätzmittel wurden neben Eisen(III)-Chlorid auch eine Mischung von verdünnter Schwefelsäure und Wasserstoffperoxid getestet. Die Maskierung, Fotolack AZ 1350 von der Firma Kalle, war in beiden Fällen gegenüber den Ätzmitteln beständig. Bei der Verwendung von Eisen(III)-Chlorid traten jedoch starke Unterätzungen an den Grenzflächen der Mumetallschichten auf. Kantenabbrüche waren die Folge, so daß dieses Ätzmittel sich in diesem Fall als nicht geeignet erwies. Bei der anderen oben erwähnten Ätzflüssigkeit trat diese Schwierigkeit nicht auf, jedoch bildeten sich bei dicken Schichten - die Jochstärke beträgt 3 bis 4 μm - ziemlich steile Kanten

aus, die bei den nachfolgenden Bedampfungen bzw. Besputterungen große Probleme aufwarfen. Da in unserem Fall noch weitere Schichten folgten, waren schräge Kanten unbedingt erforderlich, die mit Hilfe eines besonderen Verfahrens /39/ realisiert werden konnten. Dazu bringt man zwischen der Fotolackschicht und dem Mumetall eine Hilfsschicht aus Titan - wir benutzten eine Titansputterschicht von ca. 50 nm Stärke - auf. Titan erfüllt nämlich die Voraussetzung für das Erreichen der schrägen Kanten, da bei einem bestimmten Ätzlösungsgemisch die Ätzgeschwindigkeit der Titanschicht etwas größer als die der darunterliegenden Mumetallschicht ist. Dies hängt wiederum von den elektrochemischen Potentialen beider Schichten und der Ätzlösung ab. Eine solche, die diese Eigenschaften besitzt, besteht aus verdünnter Schwefelsäure, Wasserstoffperoxid und Flußsäure. Durch Variation der einzelnen Konzentrationen konnten Böschungswinkel von 10 bis 60 Grad eingestellt werden (siehe Abb. 4-3).

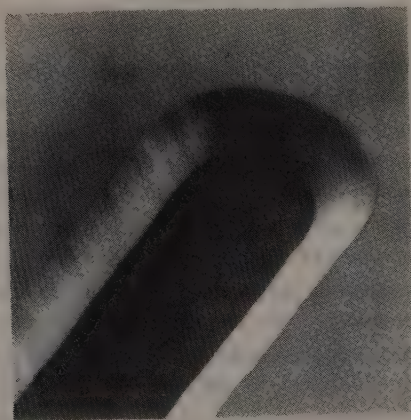


Abb. 4-3: Schräg geätzte Mumetallkanten (REM-Aufnahme in 2500facher Vergrößerung)

Von den trockenen Ätzverfahren ist nur das Ionenstrahl-ätzen möglich. Reaktives Plasmaätzen kann hier nicht angewendet werden, da bei diesem Ätzprozeß das Endprodukt aus dem zu ätzendem Material und eingelassenem Gas nach der chemischen Reaktion wiederum gasförmig sein muß. Für Nickel und Eisen sind keine Standardgase bekannt, die ein solches Verhalten zeigen. Beim Ionenstrahlätzen - es wurde eine 3 Zoll-Microetch der Firma Veeco verwendet - ist jedoch darauf zu achten, daß die Maskierung (z.B. Fotolack) dick genug ist, weil, bis auf wenige Ausnahmen, die Ätzraten der meisten Stoffe in derselben Größenordnung liegen. Unterätzungen sind bei dieser Ätzmethode nicht möglich, da bei einem Druck von ca. 10^{-4} mbar das Ätzen anisotrop erfolgt. Dafür sind die Kanten der geätzten Mumetallschicht sehr steil, was bei nächsten Prozeßschritten zu beachten ist. Die Ätzrate war bei den Versuchen mit 50 nm/min deutlich geringer als bei der naßchemischen Ätzung, wo 350 nm/min abgetragen wurden.

4.1.2 Herstellung der Leiterbahnen

Für die Wicklungen der Spule bei Dünnschichtmagnetköpfen sollten wegen des geringen Leiterquerschnitts (teilweise nur $10 \mu\text{m}^2$) gut leitende Metalle verwendet werden. Somit kamen nur Kupfer, Silber, Gold und Aluminium in Frage. Daneben waren aber noch einige Randbedingungen bei der Spulenherstellung zu berücksichtigen. Hierzu zählen die Haftung der Leiterbahn auf dem Untergrund (Siliziumdioxid, Aluminiumoxid und anderen isolierenden Materialien) und das Verhalten gegenüber der Atmosphäre. Letzteres ist deshalb wichtig, weil nach jeder Leiterbahnbedampfung ein Fototechnik- und Ätzschritt durchgeführt werden muß, und somit zwangsläufig die Oberfläche des Metallfilms mit der Luft und dem Fotolack, teilweise bei Temperaturen bis 120°C , in Verbin-

dung kommt. Bei der folgenden Bedampfung oder Besputterung ist ein einwandfreier elektrischer Kontakt mit der vorherigen Metallschicht nur dann gewährleistet, wenn sich zwischenzeitlich keine isolierende Schicht (Oxid, Sulfid usw.) gebildet hat. Daher schied Aluminium von vornherein aus, da es sich an der Atmosphäre innerhalb kürzester Zeit mit einer Schutzschicht aus Al_2O_3 überzieht. Aus Kostengründen erschien es weiterhin nicht sinnvoll, dicke Goldschichten mittels Verdampfungs- oder Sputterverfahren aufzubringen.

Stattdessen kam versuchsweise eine Kombination von Chrom-Gold-Silber-Gold-Chrom zur Anwendung, wobei die Chromschichten (Dicke ca. 10 nm) als Haftsichten, die Goldschichten (Dicke ca. 10 nm) als leitende Schutz- und Haftsicht und das Silber (Dicke bis zu 2 μm) als eigentliche Leiterbahnschicht dienten. Alle drei Materialien wurden dabei aus drei Wolframschiffchen in einem Vakuumzyklus thermisch verdampft. Zur Strukturierung kamen selektiv wirkende Ätzmittel zum Einsatz. Die dabei aufgetretenen Unterätzungen waren minimal und der elektrische Kontakt zwischen zwei Leiterbahnebenen einwandfrei.

Parallel dazu wurde die Verwendung von Kupfer als Leiterbahnmateriale getestet, um eventuell auf die teuren Edelmetalle gänzlich verzichten zu können. Wie beim Silber war auch hier eine Schichtkombination von Chrom oder NiCr als Haftsicht (Dicke: ca. 10 bis 20 nm), das Kupfer (Dicke: ca. 2 bis 3 μm) und Titan als Schutzschicht (Dicke: ca. 30 nm) sinnvoll. Insbesondere das Titan schützt das Kupfer bei der Fototechnik vor der Oxidation bzw. der oberflächlichen Reaktion mit dem Fotolack. Chrom bzw. NiCr und Titan wurden dabei gesputtert, das Kupfer selbst wurde mit der Elektronenstrahlkanone aufgedampft. Die naßchemische Ätzung konnte wieder mit selektiv wirkenden Ätzmitteln erfolgen, jedoch erwies es sich trotz der guten Ätzergebnisse als vorteilhaft, auch hier das Ionenstrahlätzverfahren zu benutzen. Bei der Übernahme in den Herstellungsprozeß des

Magnetkopfes wurden nämlich bei naßchemischen Verfahren durch Kapillareffekte tieferliegende Schichten an- bzw. weggeätzt. Dasselbe galt auch für die andere Schichtkombination aus Chrom, Gold und Silber.

Die Untersuchungen ergaben, daß sowohl Silber als auch Kupfer in Verbindung mit geeigneten Haft- und Schutzschichten zur Herstellung der Spule für den Filmkopf verwendet werden können. Die Strukturierung sollte am besten mit Hilfe der Ionenstrahlätzmethode erfolgen. Hierbei treten jedoch bekanntlich steile Kanten auf, die die Gefahr der Unterbrechung nachfolgender Schichten in sich bergen. Durch den Einsatz eines ausgleichenden Lackes konnte dieses Problem weitgehend vermieden werden.

4.1.3 Herstellung der Isolationsschichten

Um einen unerwünschten elektrischen Kontakt zwischen den beiden Magnetjochen und der Spule zu vermeiden - das untere Joch dient bekanntlich als Stromzuführung für die Spule -, ist es nötig, zwischen den Leiterbahnen und den Magnetjochen Isolationsschichten aufzubringen. Als mögliche Materialien bieten sich z.B. Siliziummonoxid, Siliziumdioxid und Aluminiumoxid an, die hinsichtlich Aufbringung und Strukturierbarkeit getestet wurden. Gesputterte Schichten sind dabei aufgedampften vorzuziehen, da sie im allgemeinen eine höhere Haftfestigkeit aufweisen. Die naßchemische Strukturierung der SiO- und SiO_2 -Schichten war mit flußsäurehaltigen Ätzmitteln, wie sie in der Halbleitertechnologie üblich sind, möglich. Bei Aluminiumoxid dagegen traten Probleme auf, da der Fotolack gegen die stark alkalische Ätzlösung nicht beständig war, so daß hier wieder auf das Ionenstrahlätzen ausgewichen werden mußte.

Für die Isolationsfüllung im Spalt, die die Spaltlänge festgelegt, ist es sinnvoll, insbesondere, wenn der Magnet-

kopf nicht als Flugkopf benutzt wird, aus Verschleißgründen ein hartes Material zu verwenden. Bei den im SPUTRON im Hochfrequenz-Verfahren (RF) aufgesputterten Aluminiumoxid-Schichten trat jedoch ein Problem auf: die Schichten waren nicht "dicht". Ursächlich hierfür ist das säulenförmige Wachstum des Oxides, was in der Abb. 4-4 deutlich dargestellt ist. An den Korn- bzw. Säulengrenzen können dann später Ätzmittel eindringen (Kapillareffekt) und darunterliegende Schichten an- oder sogar wegätzen. Dies ist jedoch unerwünscht und hat auch in unserem Fall später bei der Kombination der Schichten Probleme bereitet. Wie aus der Abbildung hervorgeht, ist es bei gewissen Temperatur- und Druckverhältnissen möglich, "dichte" Schichten zu realisieren. Unterstützen kann man dies durch Katodenzerstäubung mit RF-Bias. Da das SPUTRON über keine RF-Bias-Möglichkeit verfügt und ein Betrieb bei dem angegebenen Druck nicht möglich ist, mußte das Problem auf andere Art gelöst werden. In dem

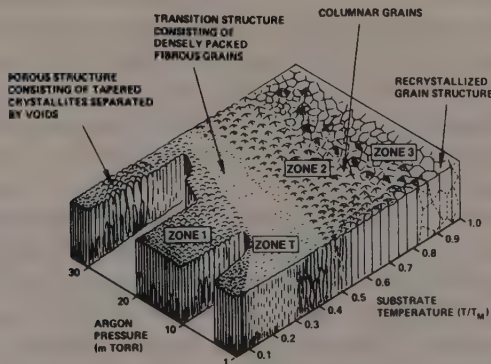


Abb. 4-4: Einfluß der Substrattemperatur und des Argondruckes auf die Mikrostruktur gesputterter Schichten /40/

Kopfherstellungsprozeß wurden daher später die nachfolgenden Schichten nicht mehr naßchemisch, sondern mit der Ionenstrahlätzanlage trocken geätzt.

Wie wir bei den theoretischen Überlegungen schon gesehen haben, ist es für die Erlangung eines guten Kopfwirkungsgrades erforderlich, den parasitären magnetischen Widerstand zwischen dem oberen und unteren Joch im Bereich der Spule möglichst groß zu halten. Dies kann durch ca. 3 bis 5 μm dicke, nicht magnetische und elektrisch nicht leitende Schichten erreicht werden. Diese dicken Schichten aus Siliziumdioxid oder Aluminiumoxid herzustellen, ist wegen der langen Sputter- und Ionenstrahlätzzeiten - beim Ionenstrahlätzen kämen noch Maskierungsprobleme dazu - wenig sinnvoll. Es mußte daher nach anderen Möglichkeiten gesucht werden, dicke Isolationsschichten aus Materialien herzustellen, die einigermaßen widerstandsfähig gegen nachfolgende Ätzflüssigkeiten und Lösungsmittel waren. Weitere Anforderungen, die an diese Schichten gestellt wurden, waren, neben der Dicke von drei bis fünf Mikrometer, eine gute Strukturierbarkeit und keine allzu steilen Kanten nach der Strukturierung, um Brüche in nachfolgenden Leiterbahn- und Magnetjochschichten an diesen Kanten zu vermeiden.

Eine gute Strukturierbarkeit ist natürlich bei Verwendung der in der Halbleitertechnologie normalerweise benutzten Fotolacke gewährleistet. Durch einen längeren Aushärtungsschritt bei höheren Temperaturen (statt 120°C nun bis 200°C) können diese einigermaßen resistent gegenüber Ätz- und Lösungsmittel gemacht werden. Diese Temperaturen dürfen allerdings nicht zu hoch sein, da sonst eine Zersetzung bzw. Oxidation des Lackes stattfindet. Darüberhinaus werden durch diese höheren Temperaturen vorteilhafterweise auch noch auftretende scharfe Kanten abgeflacht, was bei Lackversuchen beobachtet werden konnte. Jedoch stellten sich im Aceton-Ultraschallbad - dieser Prozeßschritt ist bei der Kopfherstellung mehrmals erforderlich, um den beim Ionenstrahlätzen

vernetzten Maskierungsfotolack (AZ 1350) zu entfernen - und bei langen Besputterungen (z.B. beim oberen Magnetjoch) Probleme ein. So wurde der Lack teilweise weggeschwemmt oder bekam beim Besputtern Risse.

Bessere Ergebnisse lieferten hier Polyimidlacke, bei denen, dank ihrer hohen Aushärtetemperatur von ca. 350°C , die oben genannten Schwierigkeiten nicht auftraten. Zur Verfügung standen Polyimidlacke der Firmen Hitachi Chemicals, Japan und Merck, Darmstadt, deren gewünschten Dicke durch die Drehzahl der Lackschleuder leicht eingestellt werden konnte. Der Lack HTR-1 des letztgenannten Herstellers bot gegenüber dem japanischen Produkt (PIQ) den Vorteil, daß er fotosensitiv war und daher bei der Strukturierung keine zusätzlichen Prozeßschritte nötig waren. Die Verfahrensweise war bei diesem Lack ähnlich den üblicherweise verwendeten Fotolacken. So konnten nach der Belichtung und Entwicklung ohne weiteres die gewünschten schrägen Kanten realisiert werden, doch änderte sich dieses Ergebnis nach dem sich anschließenden Aushärteprozeß bei ca. 350°C . Hierbei schrumpfte der Lack unten stärker als an der Oberfläche, so daß sehr steile und teilweise sogar überhängende Kanten entstanden. Die Abb. 4-5 zeigt die Raster-Elektronenmikroskop-Aufnahme (REM) eines unterbrochenen Magnetjoches einer Testmagnetkopfstruktur, das auf Grund der steilen Polyimidlackstufe entstanden ist. Daher ist seine Verwendung, wenn noch weitere Dünnschichtprozesse folgen, wie in unserem Fall, nicht zu empfehlen.

Dagegen konnte beim japanischen Produkt ein zufriedenstellendes Ergebnis bezüglich der Kanten erzielt werden, jedoch mußte die Strukturierung über einen zusätzlichen Fotolackschritt erfolgen. Das zum naßchemischen Ätzen des Polyimidlackes eingesetzte Mittel (PIQ-Etchant von Hitachi Chemicals) griff wegen seiner stark alkalischen Eigenschaften auch den sonst für alle Dünnschichtätzprozesse verwendeten Positivfotolack AZ 1350 so stark an, daß ein anderes Maskie-

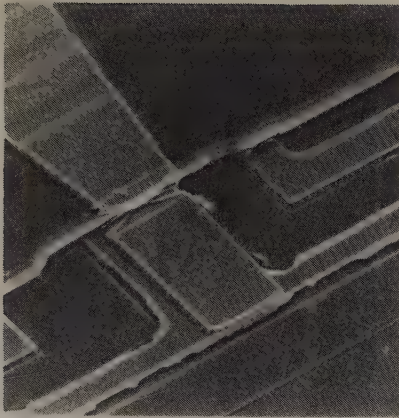


Abb. 4-5: Unterbrechung des oberen Magnetjoches bei Verwendung des HTR-Polyimidlackes (REM-Aufnahme)

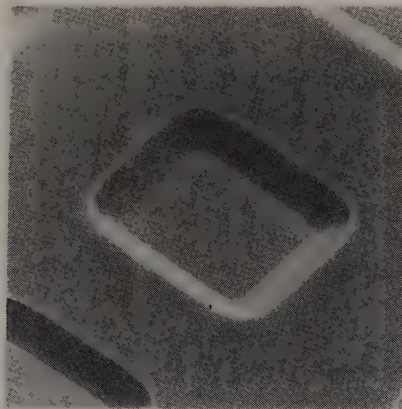


Abb. 4-6: Schräge Kanten beim PIQ-Polyimidlack (REM-Aufnahme in 1250facher Vergrößerung)



Abb. 4-7: Durchgehendes Joch bei Verwendung von PIQ-Lack
(REM-Aufnahme in 1000facher Vergrößerung)

rungsmaterial ausgesucht werden mußte. Als geeignet erwies sich der Negativlack Microresist 741 von Kodak, da dieser einerseits resistent gegen das PIQ-Ätzmittel und andererseits der Polyimidlack beständig gegenüber den Entwicklungs-, Spül- und Stripflüssigkeiten des Negativlackes ist. Mit dieser Kombination (PIQ-Polyimidlack und Negativfotolack) konnten die gestellten Anforderungen erfüllt werden. Insbesondere war hiermit die Herstellung schräger Kanten möglich (siehe Abb. 4-6). So wurde sichergestellt, daß das obere Magnetjoch keinen Bruch an dieser Kante erlitt (siehe Abb. 4-7).

4.1.4 Schichtkombination und Gesamtaufbau des Kopfes

Bisher wurde nur über die einzelnen Schichten, die zur Herstellung dieses Dünnfilmmagnetkopfes erforderlich sind, gesprochen. Bei einer Kombination der Prozessschritte muß

jedoch die gegenseitige Beeinflussung z.B. bezüglich Ätzelektivität beachtet werden. Dies klang teilweise schon in den vorangegangenen drei Abschnitten an, da diese Problematik bekannt war. So wurden die Bedampfungen, Sputterungen, Ätzungen usw. auch bei Schichtkombinationen angewandt. An speziell entwickelten Versuchsstrukturen wurden die Vorexperimente durchgeführt. Deren Ergebnisse beeinflussten dann stark das Layout, das im Kapitel 3.3 genau beschrieben wurde. So ergab sich, daß es sinnvoll ist, möglichst trockenchemische Ätzverfahren zu benutzen, um unerwünschte Unterätzungen oder Ätzungen tieferliegender Schichten zu vermeiden. Nur die Polyimidlackschichten und das untere Magnetjoch wurden im Verlauf der Kopfherstellung naßchemisch strukturiert.

Als Substrat für den Dünnschichtaufbau des Kopfes dienen thermisch oxidierte 2"-Siliziumscheiben (Oxiddicke : ca. 1 μm). Ihre glatte und polierte Oberfläche begünstigte die planare Herstellung des Dünnschichtkopfes. Die Härte des Siliziums dürfte bezüglich der Kopflebensdauer bei einem Dauereinsatz in einem Band- oder Diskettenlaufwerk nicht ausreichend sein. In einem solchen Fall wäre dann Aluminiumoxid, eventuell sogar in Form einkristalliner Saphirscheiben, dem Silizium vorzuziehen.

In der Abb. 4-8 sind schematisch sämtliche 15 Schichten dargestellt, die nacheinander im Laufe der Herstellung des Kopfes auf das Substrat aufgebracht worden sind. Zwischenzeitliche Strukturierung der Schichten wurde hierbei nicht berücksichtigt. Diesmal sind auch im Gegensatz zur Abb. 3-14 alle Zwischenschichten, wie Haft- und Schutzschichten mit aufgeführt, wobei jedoch die Schichtstärken nicht maßstabsgerecht gezeichnet sind. Die Gesamthöhe des Kopfes, ausschließlich des Substrates, beträgt ca. 18 bis 19 μm . Innerhalb eines Kopfes sind dabei Höhendifferenzen (z.B. vorne am Polspiegel) von knapp 8 μm anzutreffen. Durch eine geschickte Wahl von Fotolacken unterschiedlicher Viskosität und

15
14
13
12
11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
Silizium

- 1 Thermisches SiO_2 (1 μm)
- 2 Mumetall (3,5 μm)
- 3 Titan (30 nm)
- 4 Aluminiumoxid (500 nm)
- 5 Chrom (20 nm)
- 6 Kupfer (2,5 μm)
- 7 Titan (30 nm)
- 8 Polyimidlack (2 μm)
- 9 Chrom (20 nm)
- 10 Kupfer (2,5 μm)
- 11 Titan (30 nm)
- 12 Polyimidlack (2 μm)
- 13 Mumetall (3,5 μm)
- 14 Titan (30 nm)
- 15 Polyimidlack (2 μm)

Abb. 4-8: Komplette Schichtfolge für den Dünnschichtkopf
(Die angegebenen Dicken sind Zirkawerte)

verschiedenen Belichtungszeiten konnten die vorgegebenen minimalen Abstände bzw. Breiten von 5 μm (Designregeln!) mit Hilfe der Kontaktbelichtungsmethode noch gut erreicht werden. Teilweise traten bei der Strukturierung auch Stufen auf, die sich später beim Aufbringen anderer Schichten auf diese übertragen haben und teilweise sehr störend wirkten. Als Beispiel sei hier die Spule und das obere Joch aufgeführt. Letzteres sollte möglichst eben sein und in seiner Stärke kaum variieren, damit wenig Keimzellen zur Erzeugung von Sättigungseffekten entstehen. Wie in der Abb. 4-9 schematisch dargestellt ist, bilden sich bei der trockenchemischen Strukturierung der Spule "Täler" von ca. 2,5 μm Tiefe. Diese würden sich zwangsläufig auf das obere Joch übertragen, wenn nicht der dazwischenliegende Polyimidlack ausgleichende Eigenschaften hätte. Durch zweimaliges Aufbringen einer dünnen PIQ-Schicht konnte die Übertragung der

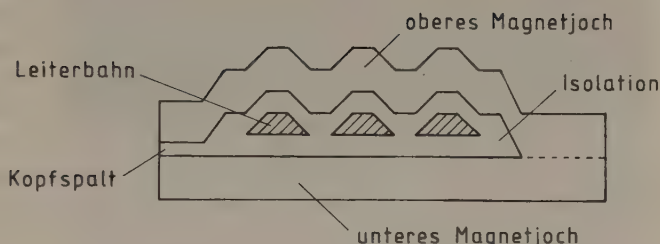


Abb. 4-9: Schematische Darstellung der Übertragung der Leiterbahn-Höhenstruktur auf das obere Magnetjoch

Spulenstruktur auf das obere Joch weitgehend verhindert werden, wie es das Querschnittsfoto eines Teiles des fertigen Kopfes, bei dem der Polspiegel aber noch nicht bearbeitet worden ist, beweist (Abb. 4-10). In diesem Bild kann man noch einmal den genauen Kopfaufbau sehen (vgl. hierzu auch die Abb. 3-9). Auf der linken Seite erkennt man die Al_2O_3 -Schicht (Dicke: ca. $0,5 \mu\text{m}$), die den Spalt zwischen den beiden Jochen bildet. Im mittleren Teil sind die beiden Flachspulen mit je sechs Windungen zu sehen, und im rechten Teil des Fotos befindet sich die Verbindung zwischen den beiden Jochen. Auffällig sind die schrägen Kanten, die beim oberen Joch so gut wie keine Brüche oder "Dünnstellen" auftreten lassen. Dazu tragen auch die unterschiedlichen Leiterbahnbreiten vorne am Polspiegel (im linken Teil des Fotos) und hinten an der Verbindung der beiden Joche (rechts im Foto) bei. Bei der unteren Flachspule ist die erste und sechste Windung breiter gewählt als bei der oberen.

Die eben beschriebene Abbildung zeigt einen Längsschnitt durch die beiden Joche und gibt nur einen Teil des Dünnfilmkopfes wieder. Dagegen ist im folgenden Mikroskopfoto (Abb. 4-11) die Draufsicht eines ganzen, aber noch nicht

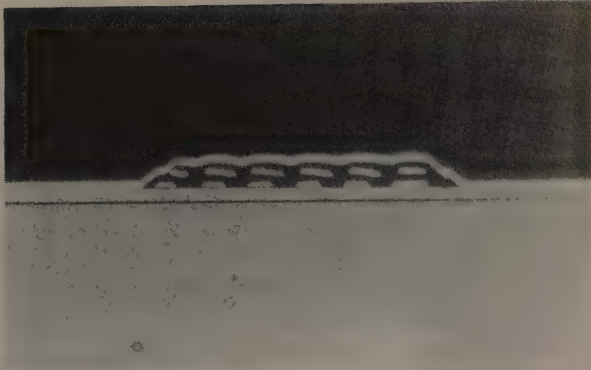


Abb. 4-10: Querschnitt durch den Magnetkopf längs der Joche (Mikroskopfoto; der Kopfpolspiegel ist noch nicht geschliffen; der Kopfspalt befindet sich auf der linken Seite; rechts sind die beiden Joche miteinander verbunden)

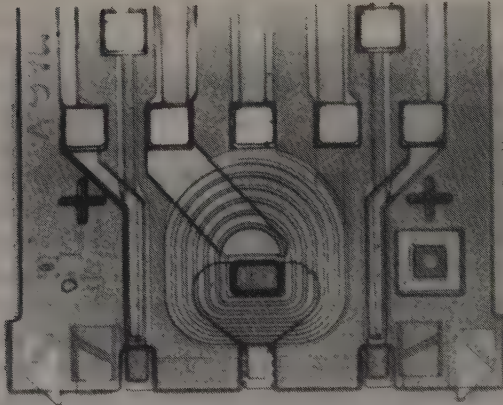


Abb. 4-11: Mikroskopaufnahme des Dünnschichtkopfes (Draufsicht) in 80facher Vergrößerung

angeschliffenen Kopfes zu erkennen. Hier sieht man auch gut, daß, um den Weg des magnetischen Flusses möglichst kurz zu halten, die Leiterbahnen der Spule zwischen den Jochen ziemlich schmal, dagegen hinten viel breiter ausgefallen sind. Das obere Joch ist dabei das "ballonförmige" Gebilde, das oben "plattgedrückt" ist. Da die Einebnung durch den Polyimidlack nicht optimal gewesen ist (siehe auch Abb. 4-10), zeichnet sich die Spule in der oberen Mumetallschicht (Joch und Leiterbahnverbindung vom Spulenzentrum zum Bondpad) ab.

Die im rückwärtigen Teil des Kopfes sichtbaren Bondpads (im oberen Teil des Fotos) dienen später zur Verbindung mit der "Außenwelt". Dabei sind eigentlich für den Betrieb nur die drei mittleren erforderlich, nämlich die beiden Anschlüsse der Spule und die Mittelanzapfung. Die restlichen vier sind mit den elektrischen Bearbeitungshilfen verbunden, die, genauso wie die optischen Hilfen zum Schleifen des Polspiegels, im vorderen Bereich des Kopfes deutlich sichtbar sind. Angeschliffen wird der Kopf bis zur eingezeichneten Linie.

Der Flächenbedarf beträgt in diesem Fall ca. 1,25 mm x 1,25 mm. Verzichtet man jedoch auf die Bearbeitungshilfen, dann reduziert er sich auf ca. 0,5 mm x 0,7 mm. Ein Mehrspurkopf mit ca. 10 Köpfen auf 5 mm wäre dabei durchaus möglich.

In der Tabelle 1 ist noch einmal eine Zusammenfassung der wichtigsten Dünnschichtprozesse einschließlich des Zeitaufwandes angegeben. Dabei sind nur die Gesamtzeiten für die einzelnen Prozesse aufgeführt, ohne die vielen Unterschritte, aus denen sie zusammengesetzt sind, mit anzugeben. Auffallend ist der große Zeitaufwand von ca. 168 Stunden allein für die Dünnschichtprozesse. Es muß aber berücksichtigt werden, daß hier nicht ein einzelner Kopf, sondern bei vier 2"-Siliziumscheiben (eine Charge umfaßte normalerweise vier Wafer) insgesamt ca. 4000 Köpfe entstanden. Bei

vier 100 mm-Wafern wären es sogar über 15000 Köpfe, ohne daß der Zeitaufwand sich erhöhen würde. Letzteres entspricht einer Herstellungszeit pro Kopf von ca. 40 Sekunden, einer Zeit, die bei konventionell gefertigten Köpfen vermutlich nicht erreicht wird.

1)	Scheibenreinigung und -oxidation	5 Std.
2)	Mumetall-/Titan-Sputtern	8 Std.
3)	Strukturierung des unteren Joches	3 Std.
4)	Aluminiumoxid-Sputtern	5 Std.
5)	Strukturierung der Aluminiumoxidschicht	8 Std.
6)	Cr-Sputtern, Cu-Bedampfung, Ti-Sputtern	7 Std.
7)	Strukturierung der unteren Spule	10 Std.
8)	PIQ-Lacktechnik	8 Std.
9)	PIQ-Strukturierung	18 Std.
10)	Titan-Ionenstrahlätzen	2 Std.
11)	Cr-Sputtern, Cu-Bedampfung, Ti-Sputtern	7 Std.
12)	Strukturierung der oberen Spule	10 Std.
13)	PIQ-Lacktechnik	8 Std.
14)	PIQ-Strukturierung	18 Std.
15)	Mumetall-/Titan-Sputtern	12 Std.
16)	Strukturierung des oberen Joches	13 Std.
17)	PIQ-Lacktechnik	8 Std.
18)	PIQ-Strukturierung	18 Std.
		168 Std.

Tabelle 1: Zeitaufwand für die Dünnschichtprozesse
(bezogen auf vier 2"-Siliziumscheiben)

4.1.5 Begleitende Meßtechnik

Für die reproduzierbare Herstellung des Dünnschichtmagnetkopfes ist es unbedingt erforderlich, die physikalischen Eigenschaften und eventuell die chemische Zusammensetzung der Schichten während der Prozesse überprüfen zu können. Hierzu zählen die Schichtdicke, die Schichtzusammensetzung und, je nach Material, deren magnetische, elektrische und isolierende Daten. Diese Messungen wurden hauptsächlich an Kontrollscheiben durchgeführt, die neben der normalen Charge miterstellt wurden. Trotz Verwendung meist zerstörungsfreier Meßverfahren waren doch gewisse Vorarbeiten an den Meßobjekten durchzuführen, die dann eine Weiterverarbeitung nicht mehr ohne weiteres zugelassen haben.

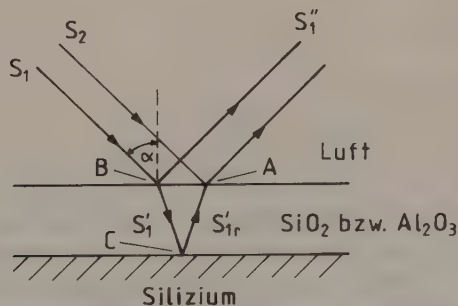


Abb. 4-12: Oxiddickenmessung (Näheres siehe Text)

Bei der Schichtdickenmessung handelt es sich um rein optische Meßmethoden. Dem ersten Verfahren liegt die Fraunhofer'sche Interferenz in einer planparallelen Platte zu Grunde. Die dünne Schicht, deren Dicke gemessen werden soll, bildet die planparallele Platte. Voraussetzung ist, daß die Schicht durchsichtig ist, was bedeutet, daß in unserem speziellen

Fall nur Oxidschichten wie SiO_2 , Al_2O_3 und eventuell auch Fotolackschichten gemessen werden können. Betrachtet man in der Abb. 4-12 den einfallenden Strahl S_1 einer ebenen Welle, so wird ein Teil von ihm (S_1'') an der Grenzfläche Luft/Oxid im Punkt B reflektiert. Der andere (S_1') dringt durch das Medium und wird an der nächsten Grenzfläche Oxid/Silizium bzw. Oxid/Metall im Punkt C reflektiert. Im Punkt A besteht dann zwischen den beiden Strahlen S_{1r}' und S_2 der Gangunterschied δ

$$\delta = 2 \cdot d \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}$$

(n = Brechungsindex der Oxidschicht; λ = verwendete Wellenlänge; α = Einfallswinkel; d = Dicke der Oxidschicht)
Falls wie in unserem Fall $\alpha = 0$ ist, ergibt sich für die Verstärkung

$$d = \frac{z \cdot \lambda}{2 \cdot n} \quad (z = 1, 2, 3, \dots)$$

und für die Auslöschung

$$d = \frac{(2 \cdot z - 1) \cdot \lambda}{4 \cdot n} \quad (z = 1, 2, 3, \dots)$$

Hieraus läßt sich bei bekannten n und λ die Schichtdicke d bestimmen. Die Abb. 4-13 zeigt ein solches Meßdiagramm für ein ca. $1 \mu\text{m}$ dickes thermisches Siliziumdioxid auf einer Siliziumscheibe. Dargestellt ist die reflektierte Lichtintensität in Abhängigkeit von der Lichtwellenlänge. Ein Verlauffilter gestattete die kontinuierliche Variation der Lichtfrequenz im sichtbaren Bereich.

Das zweite Meßverfahren zur Bestimmung von Schichtdicken beruht auf dem Prinzip des Michelson-Interferometers (siehe Abb. 4-14). Als Spiegel Nr. 2 wird die zu messende Probe verwendet. Bei ihr muß vorher ein Teil der Schicht abgeätzt

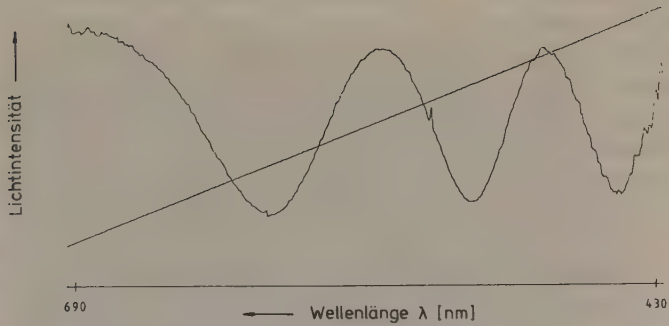


Abb. 4-13: Meßdiagramm (Interferenzen) einer ca. $1\ \mu\text{m}$ dicken SiO_2 -Schicht auf Silizium (aufgenommen mit dem Oxiddickenmeßgerät)

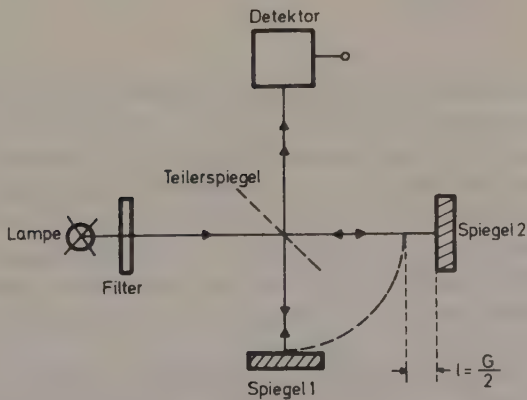


Abb. 4-14: Schematischer Aufbau eines Michelson-Zweistrahlinterferometers /41/

werden, damit eine Stufe entsteht, deren Höhe gleich der Schichtdicke ist. Die Probe ist dann noch dünn mit einem Metall zu bedampfen, wenn die zu messende Schicht und die darunterliegende Schicht (bei den Kontrollscheiben meist das Substrat) nicht reflektierend sind. So gilt nach Reflexion an den Spiegeln folgender Zusammenhang für zwei kohärente Lichtstrahlen S_1 und S_2 :

- 1) Für $2*d = z_1 * \lambda$ ($z_1 = 0,1,2,3,\dots$) erhält man keinen Versatz,
- 2) Für $2*d = z_2 * \lambda$ ($z_2 = 1/2, 3/2, 5/2, \dots$) einen halben Versatz zwischen den Lichtmaximas der beiden Teilstrahlen.

Durch eine leichte Verkipfung des Spiegels Sp_1 können die Interferenzstreifen leicht sichtbar gemacht werden (siehe Abb. 4-15). Mit Hilfe eines Verlauffilters ist es möglich, Maxima und Minima zur Deckung zu bringen. Wir können dann die Stufenhöhe (= Schichtdicke) nach der Formel

$$d = \frac{\lambda_1 * \lambda_2}{2 * |\lambda_1 - \lambda_2|}$$

berechnen, wobei λ_1 und λ_2 zwei benachbarte interferenzfähige Wellenlängen sind, d.h. $z_1 * \lambda_1 = (z_2 \pm 1) * \lambda_2$.

Auf dem Michelson-Interferometer-Prinzip beruht auch der "Optische Profiltaster", der die Weißlicht-Zweistrahlinterferenz benutzt und bei dem nach einer elektronischen Signalaufbereitung die Stufenhöhe direkt abgelesen werden kann /41/. Den Plot einer Teststruktur mit vielen Stufen unterschiedlicher Breite, die mit diesem Gerät aufgenommen wurde, zeigt die Abb. 4-16.

Diese eben behandelten Meßverfahren wurden auch zur Eichung der Quarzschichtdicken-Meßeinrichtungen in den Bedampfungs- und Sputteranlagen benutzt. Bekanntlich verringert sich die Frequenz eines Schwingquarzes mit steigendem

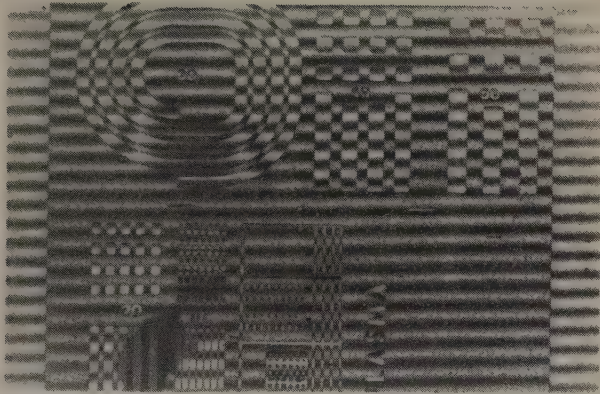


Abb. 4-15: Zweistrahlinterferenz bei einer strukturierten Kupferschicht (Dicke: ca. $2,5\ \mu\text{m}$)

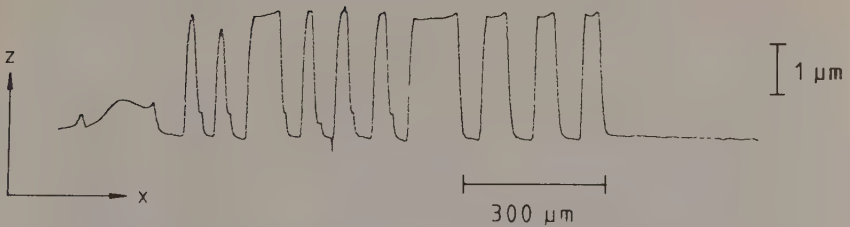


Abb. 4-16: Meßdiagramm einer ca. $2,5\ \mu\text{m}$ dicken strukturierten Kupferschicht aufgenommen mit dem "Optischen Profiltaster"

(x: abgetastete Strecke; z: Stufenhöhe)

Volumen bzw. Masse (hervorgerufen durch aufgedampftes Material). Durch einen Vergleichsoszillator kann dabei die Frequenzänderung Δf ermittelt werden. Sie hängt vom Material (Dichte), von der Position des Meßquarzes, von der Aufdampfzeit und der Verdampfungsrate ab. Dabei gilt:

$$\lg \frac{\Delta f}{\Delta d} = \lg \varrho + \lg |k| \quad \text{mit } k = - \frac{f^2 * F'}{N * \varrho_q * F}$$

(ϱ = Dichte des verdampften Materials; f = Quarzfrequenz; N = Frequenzkonstante für den AT-Schnitt; ϱ_q = Quarzdichte; F = schwingende Fläche des Quarzes; F' = bedampfte Fläche; Δd = Dickenänderung)

So ist man auch während des Bedampfungs- bzw. Sputterprozesses in der Lage, die Schichtdicke laufend zu kontrollieren.

Für die qualitative und quantitative Bestimmung der Legierungsbestandteile des Mumetalls (Schichten und Ausgangsmaterial) kamen mehrere Untersuchungsmöglichkeiten in Frage, von denen die energiedispersive quantitative Röntgenanalyse im Rasterelektronenmikroskop (REM) ausgewählt wurde. Wie die folgende Tabelle 2 veranschaulicht, zeigen gesputterte Schichten fast die gleiche quantitative Elementzusammensetzung wie das Sputtertarget. Bei den aufgedampften Schichten besteht dagegen eine viel größere Diskrepanz zu dem Ausgangsmaterial. Wie schon erwähnt dürften die unterschiedlichen Dampfdrücke der einzelnen Legierungsmaterialien hierfür verantwortlich sein. Durch die veränderten Gewichtsanteile ist dann die Magnetostriktionsfreiheit in der Schicht nicht mehr gewährleistet. Das Ergebnis sind die schlechten magnetischen Werte und die starken inneren mechanischen Spannungen bei den aufgedampften Mumetallfilmen.

Zur Messung der magnetischen Kenndaten der Mumetallschichten wurde ein Dünnschichtmagnetometer (Loop-Tracer) benutzt, dessen Prinzipaufbau in der Abb. 4-17 dargestellt ist. Mit

Mittelwerte aus fünf Messungen Zahlenwerte in Gewichts-%								
Analysen- fläche	1 [mm ²]	1 [μm ²]	100 [μm ²]	100 [μm ²]			1 [μm ²]	100 [μm ²]
Strahl- spannung in kV	30		20	20		30	20	
Probe	Mumetall-Blech			Aufdampf-Schicht			Mumetall- Späne	Sputter- Schicht
Mn	0,6	0,7	0,6	0,1	0,1	-	0,6	0,1
Fe	14,7	14,6	14,6	13,5	16,8	17,0	15,0	13,3
Ni	76,3	76,3	75,9	83,9	82,4	81,7	76,9	78,7
Cu	4,7	4,7	4,7	0,7	0,5	0,1	4,2	3,5
Mo	3,2	3,2	3,7	0,4	0,2	-	3,0	4,3

Tabelle 2: Ergebnisse der energiedispersiven
quantitativen Röntgenanalyse im
Rasterelektronenmikroskop

diesem Loop-Tracer ist man in der Lage, unter anderem die Koerzitivfeldstärke H_c und die Anisotropiefeldstärke H_k zu bestimmen und die Hystereseschleife in der leichten und schweren Richtung darzustellen. Durch zwei speziell angeordnete Aufnehmerflachspulen, die besonders für Dünnschichtpräparate geeignet sind, können gleichzeitig die longitudinale Flußänderung (Wandverschiebungen, parallel zum AC-Treiberfeld) und die transversale (Rotationsschalten, senkrecht zum AC-Treiberfeld) gemessen werden. Durch eine Streufeld- und Erdfeldkompensation wird am Meßort eine gute Feldhomogenität

von $< 0,1\%$ erzielt. Die beiden Abbildungen 4-18a und b zeigen die Magnetisierungskurven einer ca. $3,5 \mu\text{m}$ dicken gesputterten Mumetallschicht in leichter und schwerer Richtung.

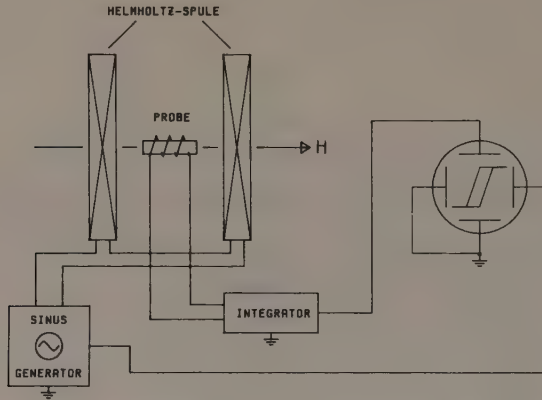


Abb. 4-17: Prinzipaufbau des "Loop-Tracers"

Neben dieser makroskopischen Untersuchung der Mumetallschichten ist auch eine mikroskopische häufig sehr aufschlußreich. Da es sich um relativ dicke reflektierende Schichten handelt, bietet sich zur Sichtbarmachung der magnetischen Bereichsstrukturen der magnetooptische Kerreffekt an. Allgemein wird linear polarisiertes Licht nach Reflexion an metallischen Spiegeln elliptisch polarisiert. Sind die Spiegel Ferromagnetika, so erfolgt in proportionaler Abhängigkeit von deren Magnetisierung in einem starken Magnetfeld zusätzlich eine Drehung und eine Änderung der Achsenverhältnisse, also eine Verzerrung der Schwingungsellipse. Nach Passieren eines solchen Lichtstrahls durch einen Analysator können dann die magnetischen Domänen sichtbar gemacht

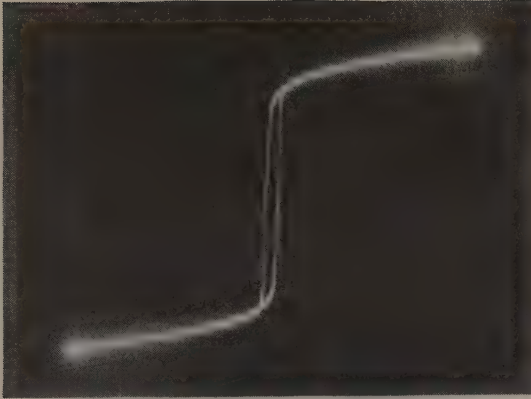


Abb. 4-18a: Hystereseschleife einer ca. 3,5 µm dicken Mumetallschicht in leichter Richtung
(x-Achse: 1 Skt. = 0,4 kA/m)

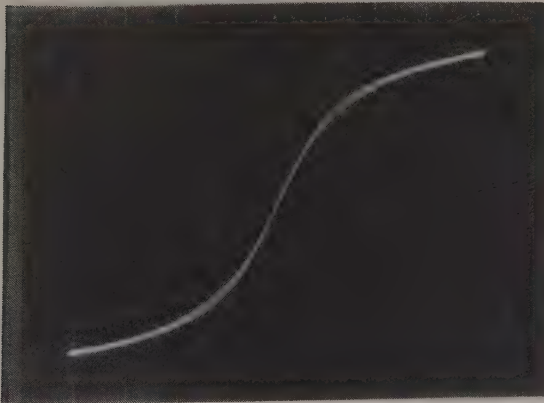
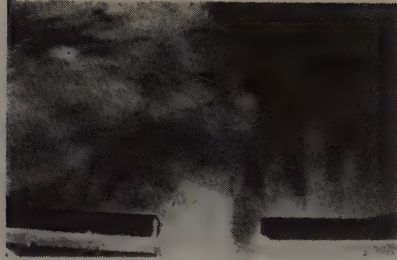
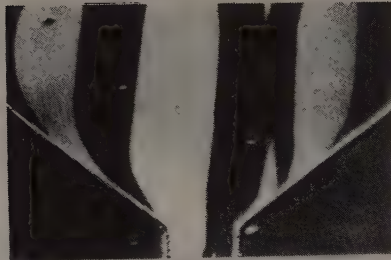


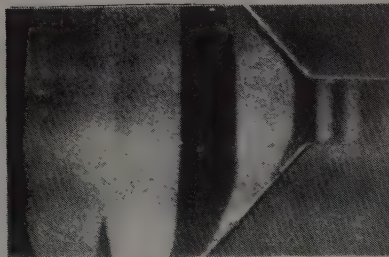
Abb. 4-18b: Hystereseschleife einer ca. 3,5 µm dicken Mumetallschicht in schwerer Richtung
(x-Achse: 1 Skt. = 0,4 kA/m)



a) teilweise senkrecht stehende Domänen



b) senkrecht zum Polspiegel liegende Domänen



c) parallel zum Polspiegel liegende Domänen

Abb. 4-19: Domänenstrukturen im oberen Magnetjoch (Mumetal),
sichtbargemacht mit Hilfe des magnetooptischen
Kerr-Effektes

werden. Der Effekt ist aber teilweise nur schwach ausgeprägt, so daß häufig durch eine zusätzliche dünne Schicht von ZnS auf dem Mumetall erst eine Sichtbarmachung möglich ist ($\lambda/4$ -Interferenz). Zusätzlich wurden in diesem Fall durch eine spezielle elektronische Bildverarbeitung /42/ die Domänen gut sichtbar auf den Abbildungen 4-19a bis c dargestellt. In der Abb. 4-19a sind die Domänen einer ca. $3,5 \mu\text{m}$ dicken Mumetallschicht zu sehen. Sie stehen senkrecht zur Oberfläche. Dagegen liegen sie bei den in den beiden anderen Fotos parallel zur Oberfläche und insbesondere bei c), wie gewünscht, parallel zum Polspiegel. Letzteres ist nämlich, wie schon früher erwähnt, Voraussetzung dafür, daß die Um-magnetisierung des Joches hauptsächlich über Drehprozesse erfolgt.

Die Leitfähigkeits- und Isolationsmessungen wurden nur qualitativ auf einem manuellen Wafer-Prober, wie er auch in der Halbleitertechnologie verwendet wird, vorgenommen. Hierbei war nur wichtig zu erfahren, ob zum Beispiel die gewünschte elektrische Verbindung zwischen den beiden Flachspulen sichergestellt und die Spulen nicht unterbrochen waren.

Abschließend ist noch zu erwähnen, daß laufend zwischen den einzelnen Prozessen optische Kontrollen, meist mit Hilfe des Mikroskopes, durchgeführt wurden. Konnten hier keine eindeutigen Ergebnisse erzielt werden, wurde in einigen Fällen auf das Rasterelektronenmikroskop (REM) zurückgegriffen. Insbesondere bei den Schichtstufen (Kanten) war hier durch die stärkere Vergrößerung und die dreidimensionale Betrachtungsweise deren genaue Form besser erkennbar, wie es die REM-Aufnahmen in diesem Kapitel deutlich zeigten.

4.2 Konfektionierung

Wie in der Halbleitertechnologie die Chips, so liegen auch hier nach den Dünnschichtprozessen die Filmköpfe in einer Form vor, in der sie noch nicht einsatzfähig sind. Sie müssen deshalb noch einige Prozesse durchlaufen, die man als Konfektionierung bezeichnet. Hierzu zählen das Zerteilen des Wafers, das Aufbringen auf einen Kopfträger, die Herstellung der elektrischen Verbindungen, die Schutzverkapselung und das Bearbeiten des Polspiegels. Von diesen Prozessen soll in den folgenden beiden Abschnitten die Rede sein.

4.2.1 Sägen, Bonden, Verkapseln

Bisher lagen sämtliche Köpfe nebeneinander auf einer Siliziumscheibe vor. Um sie weiterverarbeiten zu können, muß der Wafer zerteilt werden. Hier bieten sich zwei Möglichkeiten an, nämlich a) das Ritzen und Brechen und b) das Zersägen. Beim ersten Verfahren wird mit einem Diamanten die Siliziumscheibe in den vom Lack, Metall und eventuell auch Oxid freigelegten Ritzgräben angeritzt und anschließend gebrochen. Besonders bei Siliziumwafern mit der Kristallorientierung 1-1-1 traten Schwierigkeiten auf, da sie häufig nicht an den angeritzten Stellen, sondern längs der Kristallachsen brachen. Demgegenüber bietet die Sägemethode Vorteile. Mit einem schnellaufenden diamantbestückten Sägeblatt (Dicke: ca. 50 µm) konnten dabei die Wafer problemlos ganz oder teilweise durchgesägt werden. Hierbei war es jedoch sinnvoll, die Siliziumscheibe ganzflächig mit Fotolack zu versehen, da der beim Sägen entstehende Siliziumstaub von nicht geschützten Scheiben nur sehr schwer zu entfernen war und die Gefahr eventuell später auftretender Fehlfunktionen der Bauelemente bestand. Vorher empfahl es sich noch, einen optischen und elektrischen Test (Widerstand der Spule)

durchzuführen und die defekten Bauelemente für eine spätere Aussonderung zu markieren, bevor sie den weiteren Prozessen unterworfen wurden.

Diese einzelnen Chips mit den Köpfen wurden nun auf einen, wegen der besseren Haftung angeätzten Glasträger mit einem Zweikomponentenkleber fixiert. Auf diesem Glas befanden sich auch die Elektrodenanschlüsse, auf die gebondet und gelötet werden konnte. Die Bondung zwischen diesen Elektroden und den Anschlußpads auf dem Kopf-IC erfolgte mit Hilfe des Ultraschallverfahrens. Zur Verwendung kamen Aluminiumdrähte (Dicke: ca. 25 μm). Aus Sicherheitsgründen wurden wegen der verhältnismäßig hohen Strombelastung später im Betrieb (bis zu 0,25 A) zwei bis drei Bonddrähte pro Verbindung benutzt. Von den Kupferelektroden des Glasträgers führen dann angelötete Drähte zur Schreib-/Leseelektronik. Zum späteren Testen der Köpfe in einem Diskettenlaufwerk wurde dies System Glas/Kopf-IC noch auf einem speziell geformten Aluminiumteil befestigt, um einen schnellen Wechsel der Köpfe vornehmen zu können.

Zum Schluß mußten der Kopf und die Bondung noch vor Beschädigung von außen geschützt werden. In der IC-Technologie erfolgt dies bekanntlich dadurch, daß das gesamte System mit Kunststoff umspritzt bzw. bei Keramikgehäusen ein Deckel aufgelötet wird. In unserem Fall genügte meist ein oder zwei Tropfen Epoxidharz, um dem Kopf einen genügenden Schutz zu gewähren.

4.2.2 Polspiegelbearbeitung

In der vorliegenden Form sind die Köpfe weder in der Lage, auf einen magnetischen Datenträger Informationen zu schreiben, noch irgendwelche Daten wieder zu lesen. Erinnern wir uns an die Kopfberechnungen mit dem Transmission-Line-Modell. Hier spielte unter anderem für die Effektivität und

das Magnetfeld im Spalt die Spalttiefe l_b (siehe Abb. 3-9), also die Länge, auf der das obere und das untere Joch nur durch das Füllmaterial des eigentlichen Kopfspaltes getrennt sind, eine entscheidende Rolle. So beträgt der mit dem Transmission-Line-Modell-Programm ermittelte Unterschied zwischen bearbeiteten ($l_b = 5 \mu\text{m}$) und unbearbeiteten ($l_b = 70 \mu\text{m}$) Köpfen bei einer relativen Permeabilität von 200 ca. zwei Zehnerpotenzen, wobei die schlechteren Daten die nicht angeschliffenen Köpfe besitzen.

Zu den im folgenden beschriebenen manuellen Bearbeitungsprozessen muß erwähnt werden, daß sie ausnahmslos an einzelnen Köpfen vorgenommen wurden. Die Kontrolle erfolgte ausschließlich auf optischem Wege (Mikroskop), d.h. die elektrischen Bearbeitungshilfen wurden nicht benutzt. Letztere wären bei einem automatisch ablaufenden maschinellen Anschleifen jedoch unbedingt erforderlich.

Als Hilfsmittel zur Bearbeitung standen Schleifgeräte zur Verfügung, die unter anderem zur Herstellung von Schräggeschliffen in der Halbleitertechnologie verwendet werden. Dies war für das grobe Vorschleifen bis in die Nähe des gewünschten Endpunktes eine Naßschleifmaschine vom Typ Knürr-Rotor, bei der Schleifpapiere der Körnung 220, 800 und 1200 zur Anwendung gelangten. Für das Feinschleifen bzw. Polieren wurden einerseits eine Struers-Poliermaschine - zum Einsatz gelangten Diamantpolierpasten von $15 \mu\text{m}$ und $3 \mu\text{m}$ - und andererseits Al_2O_3 -haltige Läppbänder aus Polyester benutzt. Bei den Schleifversuchen stellte es sich bald heraus, daß ohne Deckglas - in unserem Fall hatte es eine Dicke von $50 \mu\text{m}$ und wurde ebenfalls mit Epoxidharz auf dem vorderen Teil des Kopf-IC aufgeklebt - ein unerwünschtes Rundschleifen des Kopfes auftrat (siehe Abb. 4-20a). Ein weiteres Phänomen, das sich trotz der Verwendung des Deckglases beim Schleifen auf der Poliermaschine zeigte, war auf die Weichheit der Poliertücher zurückzuführen. Die zwischen dem Deckglas und dem Siliziumsubstrat liegenden Schichten

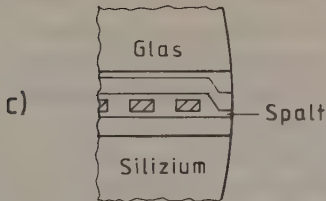
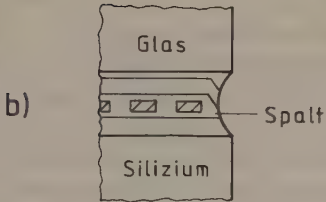


Abb. 4-20:

Kopfschleifergesulte bei
der Polspiegelbearbeitung
(Näheres siehe Text)

a) ohne Deckglas

b) auf Poliermaschine mit
Poliertüchern

c) mit Schleif- bzw.
Läppbändern

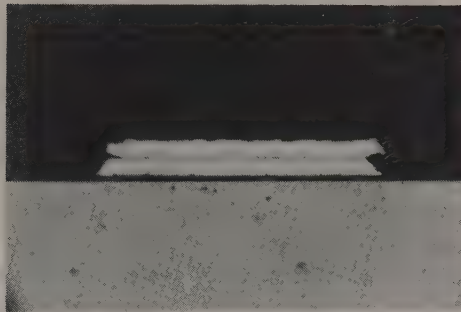


Abb. 4-21: Mikroskopaufnahme des geschliffenen Polspiegels
(Vergrößerung: 1000fach)

aus Polyimidlack, Epoxidharz und Mumetall sind nicht so hart und wurden stärker abgetragen, so daß ein Aushöhleffekt, wie er schematisch in der Abb. 4-20b dargestellt ist, auftrat. Dieser unterschiedliche Abtrag - häufig über ein Mikrometer - war so stark, daß man mit diesen Köpfen bei 100 mA Schreibstrom keine Standarddiskette ($H_c = 24$ kA/m) mehr beschreiben konnte. Bei Verwendung der oben erwähnten Läppbänder traten diese unerwünschten Aushöhlungen nicht auf. Zusätzlich erfolgte das Schleifen etwas ballig (siehe Abb. 4-20c), so daß sich der Kopf später beim Einsatz dem magnetischen Medium (Band, Diskette) gut anpassen konnte. Das Mikroskopfoto (Abb. 4-21) zeigt den Polspiegel eines so geschliffenen und schon eingesetzten Dünnfilmmagnetkopfes.

Abschließend kann vermerkt werden, daß es möglich ist, die Polspiegelbearbeitung der Köpfe mit Hilfe der oben beschriebenen Methoden durchzuführen. Da dabei viele Arbeiten nur seriell und fast alle manuell erfolgen müssen, schlägt der Zeitaufwand pro Kopf hier mit ca. drei Stunden unverhältnismäßig hoch zu Buche. Im Vergleich dazu beträgt er pro Kopf bei den Dünnschichtprozessen weniger als vier Minuten, wenn man vier 2"-Scheiben verwendet und eine Ausbeute von 75% zugrunde legt.

Mit den in diesem 4. Kapitel beschriebenen Arbeiten ist die eigentliche Kopfherstellung beendet. Es wurden dabei verschiedene Verfahren zum Aufbringen und Strukturieren der einzelnen Schichten getestet. Nach der Kombination letzterer, die schließlich zu den Dünnfilmköpfen führten, schlossen sich Bearbeitungsprozesse an, die einen Einsatz dieser Köpfe in einem speziellen Diskettenlaufwerk erst ermöglichen.

5 Messungen am Dünnfilmmagnetkopf

Bisher wurde nur über die Herstellung, also die einzelnen Aufbring-, Strukturierprozesse und die anschließende Kopfspiegelbearbeitung, berichtet. Über das Funktionieren und die elektrischen und magnetischen Eigenschaften des Kopfes konnten bis zu diesem Punkt keine eindeutigen Aussagen gemacht werden. Das Ziel dieses Kapitels besteht darin, mehrere elektrische und magnetische Kopfparameter zu bestimmen und diese mit den früher theoretisch berechneten Werten zu vergleichen. Dabei sollen zunächst die elektrischen Kenndaten ermittelt werden, wobei ein Einsatz des Kopfes im Laufwerk nicht erforderlich ist. Dies geschieht erst bei der Bestimmung der Schreib- und Leseigenschaften, mit der sich der zweite Teil dieses Kapitels befaßt.

5.1 Widerstand und Strombelastbarkeit

Qualitative elektrische Messungen wurden schon im Abschnitt über die begleitende Meßtechnik bei der Herstellung des Dünnfilmmagnetkopfes kurz angesprochen. Auch die hier aufgeführten Daten wurden teilweise noch an den ungeschliffenen Köpfen auf dem unzerteilten Wafer ermittelt. Zur Messung wurde dabei ein automatischer Wafer-Prober benutzt. Der Widerstand der Gesamtpule (12 Windungen) betrug ca. 8Ω . Die Abweichungen innerhalb einer Herstellungsladung - meist vier Scheiben - waren, abgesehen von defekten Köpfen, kleiner als $\pm 10\%$. Dabei besaß die untere Flachspule wegen der teilweise etwas größeren Leiterbahnbreite (vgl. dazu Abb. 3-9) einen leicht geringeren Widerstand (ca. $3,8 \Omega$) als die obere Flachspule (ca. $4,2 \Omega$). Hinzu kommt, daß die Verbindung der oberen Spule von der Spulenmitte zum Anschluß-Bondpad nicht in Kupfer, sondern aus herstellungstechnischen Gründen in Mumetall ausgeführt ist

(theoretischer Widerstand: $0,3 \Omega$), das einen größeren spezifischen Widerstand als Kupfer besitzt ($\rho_{Cu} = 1,7 \mu\Omega\text{cm}$; $\rho_{Mu} = 60 \mu\Omega\text{cm}$). Der theoretisch ermittelte Wert beträgt von Anschlußpad zu Anschlußpad ca. $5,2 \Omega$. Die Diskrepanz zu den gemessenen Werten ist hauptsächlich auf Kontaktwiderstände an den Stellen zurückzuführen, an denen Metallschichten unterschiedlicher Maskenebenen miteinander verbunden sind. Durch eine Vierelektrodenmessung wurden bei diesen Untersuchungen die an den Proberspitzen auftretenden Übergangswiderstände und die Leitungswiderstände der Proberzuleitungen eliminiert.

Beim Entwurf des Kopfes wurde gefordert, daß Schreibströme bis zu 100 mA von der Spule aufgenommen werden müssen. Dabei dürfen keine bleibenden Schäden auftreten. Bei den Tests wurde die Stromstärke jedoch höher gewählt. So überstanden die meisten Köpfe einen Dauergleichstrom von 250 mA (Testzeit: 60 Minuten) unbeschadet, obwohl der Leiterbahnquerschnitt der Windungen masken- und prozeßbedingt nicht den theoretischen Wert von $15 \mu\text{m} \times 2,5 \mu\text{m}$ besaß, was einer Stromdichte von ca. $10 \text{ mA}/\mu\text{m}^2$ entsprach. Diese Messungen wurden an den noch unzerlegten Wafern durchgeführt. Durch die gute Wärmeleitung von Silizium, der großen Wärmekapazität der Scheibe und dem großflächigen Kontakt zwischen dem Wafer und dem Probentisch war eine ausgezeichnete Kühlung gewährleistet. Daher dürfte die Belastungsmöglichkeit eines einzelnen Chips etwas kleiner sein.

Bei einer weiteren Erhöhung des Stromes zeigten sich zunehmend Ausfälle. Verantwortlich dafür waren zwei Ursachen. Erstens existiert an der Vorderseite des Kopfes ein Leiterbahnstück von ca. $60 \mu\text{m}$ Länge, das geometriebedingt nur eine theoretische Breite von $10 \mu\text{m}$, praktisch jedoch nur eine von ca. $6 \mu\text{m}$ besitzt. Sie bildet somit eine Schwachstelle, die bei Überlastung als erste unterbrochen wird, was in mehreren Experimenten beobachtet werden konnte. Zweitens traten bei diesen großen Strömen ($> 250 \text{ mA}$) verschiedentlich Ablösungen

der Anschlußpads infolge eines schlechten elektrischen und damit heißgewordenen Kontaktes mit der Proberspitze auf. Durch die Wahl mehrerer paralleler Bonddrähte bei der endgültigen Kontaktierung kann dieses Risiko weitgehend gemindert werden. Trotzdem wird, wie in der Halbleitertechnik, die Bondung auch hier weiterhin eine Fehlerquelle bleiben.

5.2 Induktivität und Kapazität

Um dynamische Messungen durchführen zu können, ist es unbedingt erforderlich, den Wafer mit den einzelnen Köpfen zu zerteilen. Da der Prober keine aktiven Meßspitzen besitzt, werden durch diese und deren Zuleitungen so große parasitäre Kapazitäten und Induktivitäten in das Meßsystem eingebracht, daß es Probleme bereitet, die genauen Werte für den Kopf zu ermitteln. Daher wurden mehrere nicht angeschliffene Köpfe - meist zwei bis vier Stück - in ein T0-99 oder T0-100 Gehäuse eingebaut und mit den Gehäuseanschlüssen durch Bonddrähte verbunden. Somit war gewährleistet, daß die parasitären Kapazitäten und Induktivitäten möglichst klein gehalten wurden. Die Abb. 5-1 zeigt ein vereinfachtes Ersatzschaltbild, das später zur Ermittlung der Kapazität - eigentlich handelt es sich um verteilte Kapazitäten, die zu einer Gesamtersatzkapazität zusammengefaßt sind - und Induktivität des Kopfes benutzt wurde. Danach kann man den Kopf

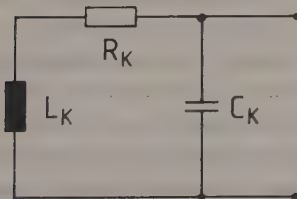


Abb. 5-1:

Einfaches elektrisches
Ersatzschaltbild für
einen Magnetkopf

als einen verlustbehafteten Parallelschwingkreis mit der Impedanz

$$\underline{Z} = \frac{j\omega L_k + R_k}{1 + j\omega R_k C_k - \omega^2 L_k C_k}$$

und der Resonanzfrequenz

$$\omega_D = \frac{1}{\sqrt{L_k C_k}} * \sqrt{1 - R_k^2 C_k / L_k}$$

auffassen. Da in diesem Fall $R_k^2 C_k / L_k \ll 1$ ist, kann mit der Resonanzfrequenz $f = 1/(2\pi * \sqrt{L_k C_k})$ gerechnet werden. Durch eine Entdämpfung dieses LC-Schwingkreises, zum Beispiel in einer Differenzverstärkerschaltung (siehe Abb. 5-2), ist die Erzeugung von Sinusschwingungen möglich. Hier erwies es sich als günstig, die Schaltung nicht diskret aufzubauen, sondern einen Baustein MC 1648 (Motorola) zu verwenden, da dieser neben dem emittergekoppelten Oszillator noch eine Amplitudenregelung und eine Endstufe enthält, die eine Entkopplung für die nachfolgende Beschaltung bietet. Die Abb. 5-3 zeigt die Meßschaltung, die sehr kompakt aufgebaut wurde, um die parasitären Induktivitäten und Kapazitäten möglichst klein zu halten. Durch eine Variation des zusätzlich eingefügten Kondensators C' zwischen 0 und 33 pF konnte man aus den zugehörigen Resonanzfrequenzen - sie betrugen je nach C'-Beschaltung zwischen 60 und 140 MHz - die Induktivität des Kopfes und dessen Eingangskapazität bestimmen. Die Auswertung wurde vornehmlich bei den niedrigeren Frequenzen zwischen 60 und 80 MHz vorgenommen, da hier noch eine einwandfreie Sinusschwingung beobachtbar war. Ab 100 MHz traten starke Verzerrungen auf, weshalb diese Meßwerte nicht mitberücksichtigt wurden.

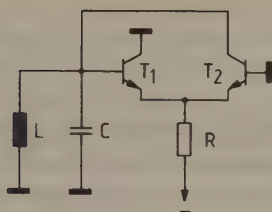


Abb. 5-2:

Emittergekoppelter
Oszillator /43/

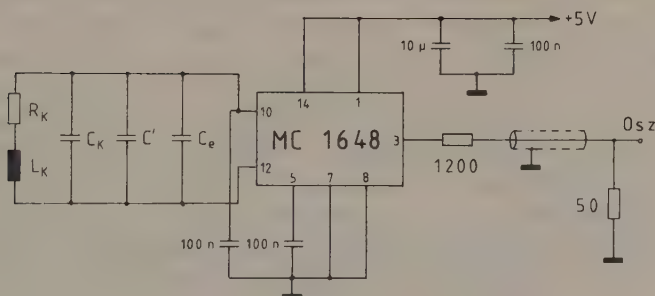


Abb. 5-3: Oszillatormeßschaltung zur Bestimmung der Kopfresonanzfrequenz (L_K = Kopfinduktivität; R_K = ohmscher Widerstand der Spule; C_K = Kopfkapazität; C_e = Eingangskapazität des MC 1648; C' = variable Zusatzkapazität)

In der Abb. 5-4 sind die Normalverteilungen der Induktivität L und der Kapazität C von 20 verschiedenen Köpfen aus einer Charge dargestellt. Die durch die Zuleitung verursachte Induktivität (Kopf-IC-Gehäuse) ist dabei enthalten. Sie wurde ebenfalls mit der Resonanzmethode zu ca. 17nH ermittelt. Faßt man vereinfacht die Bonddrähte und die Anschlußdrähte des Kopf-Gehäuses als eine in Luft verlegte Doppelleitung auf, so ergibt sich mit Hilfe der Formel aus /44/

$$L = \frac{\mu_0 \cdot l}{\pi r} \cdot (\ln(a/r) + 0,25)$$

(l = einfache Länge der Bond- und Gehäusedrähte; a = Drahtabstand; r = Leiterradius) die Induktivität zu 16 nH. Das Ergebnis stimmt also mit dem praktisch ermittelten Wert gut überein.

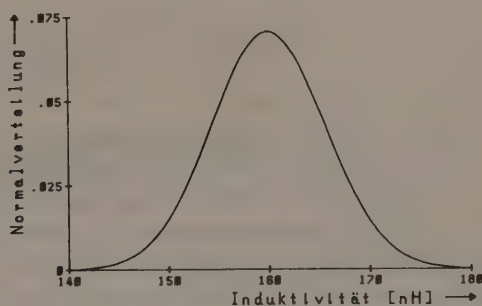


Abb. 5-4a: Aus der Resonanzfrequenz bestimmte Kopfinduktivität

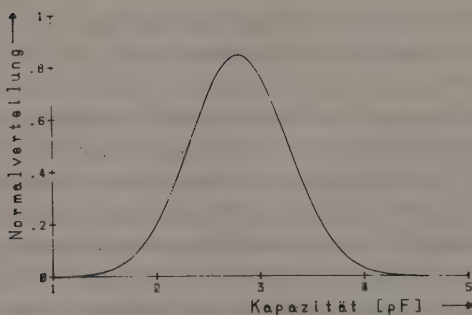


Abb. 5-4b: Aus der Resonanzfrequenz bestimmte Kopfkapazität

Diese verhältnismäßig niedrige Kopfinduktivität - mit knapp 160 nH über zehnmal geringer als bei herkömmlichen Köpfen - bietet eine gute Voraussetzung dafür, daß die Köpfe bei hohen Frequenzen im MHz-Bereich einsetzbar sind.

Erinnern wir uns an das 3. Kapitel, in dem unter anderem die theoretischen Berechnungen des Kopfes mit dem Transmission-Line-Modell durchgeführt worden sind. Dieses Modell ermöglichte auch die Induktivität in Abhängigkeit von der Geometrie des Kopfes und der relativen Permeabilität der weichmagnetischen Schichten (oberes und unteres Magnetjoch) zu bestimmen. Da die Abmessungen des Kopfes bekannt sind, kann man aus der gemessenen Induktivität auf die Permeabilität schließen. Es ist jedoch dabei zu beachten, daß die aus dem Transmission-Line-Modell gewonnene Induktivität nur einen Teil der Gesamtinduktivität des Kopfes ausmacht. Sie berücksichtigt nämlich nur den Teil zwischen dem Polspiegel und der Verbindung der beiden Joche. Weiter müssen dann noch der "freiliegende" Teil der Spiralspule und die Induktivität der Anschlußdrähte, die, wie schon vorhin ermittelt, mit 17 nH zu Buche schlagen, berücksichtigt werden.

Die Bestimmung der Induktivität des freiliegenden Teils der Spiralspule gestaltet sich etwas schwieriger. Nach /45/ gilt für die Induktivität einer flachen Spiralspule folgende Näherungsformel:

$$L = N^2 \cdot d_1 \cdot (\mu_0/4) \cdot \left[(1+x) \cdot \ln \frac{1}{1-x} + \frac{a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2}{1 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot x^2} \right]$$

(mit $a_0 = 1,109191$; $a_1 = 2,540515$; $a_2 = 2,817601$;
 $b_1 = 1,182568$; $b_2 = -0,135757$; $x = d_0/d_1$; d_1 = Außendurchmesser der Spiralspule ; d_0 = Innendurchmesser der Spiralspule).

In unserem Fall handelt es sich jedoch um zwei übereinanderliegende Spiralspulen. Deren Induktivität ergibt sich aus

der Summe der Induktivität L jeder einzelnen Spule und der Wechselwirkungsinduktivität M , d.h. $L_{\text{ges}} = 2 \cdot (L + M)$. Das Verhältnis L_{ges}/L ist dabei eine Funktion des Abstandes h der beiden Spiralspulen. In /46/ ist diese Abhängigkeit angegeben. Da im vorliegenden Fall der Abstand $h \ll d_1$ ist, gilt $L_{\text{ges}} \approx 4 \cdot L$. Dies ist damit gleichbedeutend, daß man nur eine Spiralspule betrachtet, die 12 anstatt 6 Windungen besitzt. So ergibt sich für die Kopfspule, die annähernd spiralförmig ist, L_{ges} zu ca. 44 nH.

Hierbei wurde jedoch nicht die weichmagnetische Schicht, die sich unter der gesamten Spule befindet (unteres Magnetjoch), mitberücksichtigt. Da die Einbringung von weichmagnetischen Material (Erhöhung von μ_r) den magnetischen Widerstand verringert, gilt mit den Beziehungen $\phi = N \cdot I / R_M$ und $L = N \cdot \phi / I$, daß sich die Induktivität L umgekehrt proportional zum magnetischen Widerstand R_M verhält, d.h. $L = N^2 / R_M$ (ϕ = magn. Fluß; N = Windungszahl; I = Strom). In diesem speziellen Fall läßt sich mit den folgenden Überlegungen die Induktivität bei der Anwesenheit von Material mit $\mu_r \gg 1$ annähernd berechnen:

Die Ausdehnung der Spule in z -Richtung sei sehr klein. Vernachlässigen wir die isolierenden Gebiete zwischen den Windungen der Spule, dann erhalten wir eine "Lochscheibe", wobei nun folgende Beziehung gelten soll:

$$i(r) = \begin{cases} 2 \cdot I \cdot N / (d_1 - d_0) & \text{für } d_0/2 \leq r \leq d_1/2 \\ 0 & \text{für alle anderen } r \end{cases}$$

d.h. überall in dieser "Lochscheibe" herrscht die gleiche Stromdichte. Denken wir uns nun einen infinitesimal dünnen Stabmagneten mit der Länge dx und einem, vom Spulenstrom i hervorgerufenen, maximalen H_x -Feld von H_0 (siehe Abb. 5-5). Dieser soll ein kleines Stückchen der "Lochscheibe" mit der Länge $dl = dx$ und der Breite dy repräsentieren. Legen wir

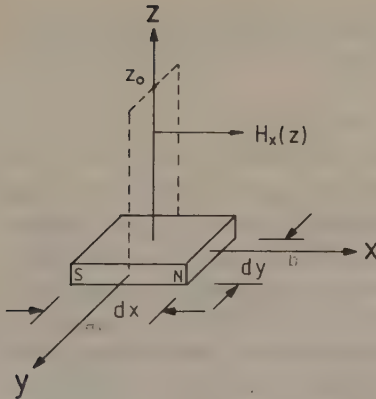


Abb. 5-5:

Infinitesimal dünner Stabmagnet der Länge dx und der Breite dy im Ursprung

den Ursprung des Koordinatensystems in die Mitte dieses Stabmagneten, so können wir in Anlehnung an das Karlquist-Magnetfeld die Abhängigkeit des H-Feldes angeben:

$$H_x(z) = \frac{2 \cdot H_0}{\pi} * \operatorname{arctg} \frac{dy}{2 \cdot z} \quad (x = y = 0)$$

Daraus folgt für den Fluß $d\phi$ durch die Fläche $z_0 \cdot dy$ (im Vakuum oder Luft):

$$d\phi = \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot H_0 \cdot dx}{\pi} * \int_0^{z_0} \operatorname{arctg} \frac{dy}{2 \cdot z} \cdot dz$$

Wenn wir nun eine weichmagnetische ($\mu_r > 1$), unendlich ausgedehnte Scheibe der Dicke $t > 0$ so einführen, daß sie mit ihrer Grundfläche in der x-y-Ebene ($z = 0$) liegt, so kann man das Integral in zwei Anteile zerlegen:

$$d\phi = \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot H_0 \cdot dx}{\pi} \cdot (\mu_r \cdot \int_0^t \operatorname{arctg} \frac{dy}{2 \cdot z} \cdot dz + \int_t^{z_0} \operatorname{arctg} \frac{dy}{2 \cdot z} \cdot dz)$$

(gültig für $z_0 \gg t$)

Unter der Berücksichtigung der Beziehung $dR = N \cdot I / d$ sei im folgenden dR_{ges} der magnetische Widerstand ohne weichmagnetisches Material, der sich aus der Addition der spiegelsymmetrischen Anteile dR_{oben} (oberer Halbraum, $z \geq 0$) und dR_{unten} (unterer Halbraum, $z < 0$) ergibt. Für den Widerstand mit der oben angegebenen weichmagnetischen Schicht, die sich nun im unteren Halbraum ($z < 0$) befinden soll, gilt dann $dR'_{\text{ges}} = dR'_{\text{oben}} + dR'_{\text{unten}}$. Mit $dR'_{\text{oben}} = dR_{\text{oben}}$ ($= dR_{\text{unten}}$) ergibt sich dann die gesuchte Induktivität L' zu

$$\frac{L'}{L} = \frac{dR_{\text{ges}}}{dR'_{\text{ges}}} = \frac{2 \cdot dR_{\text{unten}}}{dR_{\text{unten}} + dR'_{\text{unten}}} = \frac{2}{1 + (d\phi/d\phi')}$$

Die allgemeine Lösung des oben angegebenen Integrals für $d\phi$ lautet:

$$\int \operatorname{arctg} \frac{dy}{2 \cdot z} \cdot dz = z \cdot \operatorname{arctg} \frac{dy}{2 \cdot z} + \frac{dy}{4} \cdot \ln \left(\frac{(dy)^2}{4} + z^2 \right)$$

Um den totalen magnetischen Fluß zu erfassen, müßte die obere Integrationsgrenze z_0 gegen unendlich gehen, was zwangsläufig dazu führt, daß auch der zweite Term mit dem Logarithmus, wenn auch nur schwach, gegen unendlich strebt. Durch die Wahl eines hinreichend großen, endlichen Wertes für z_0 kann der dabei auftretende Fehler vernachlässigt werden. Mit $dy = 1 \mu\text{m}$, $t = 3,75 \mu\text{m}$, $z_0 = 10^6 \mu\text{m}$ und $L = 44 \text{ nH}$ gelangt man zu einem L' von

$$L' = \frac{88 \cdot (\mu_r + 4,14)}{\mu_r + 9,28} \quad [nH]$$

Die soeben aufgeführten Ableitungen beziehen sich zunächst auf den magnetischen Fluß durch die Fläche $z_0^* dy$ an der Stelle $x=y=0$. Im Bereich $d_0/2 < r < d_1/2$ ist das Verhältnis $d\phi/d\phi'$ jedoch überall gleich, da die Spule in der Symmetrieebene der beiden Halbräume liegt und jedes Stück der "Lochscheibe" als ein kleiner Stabmagnet angesehen werden kann. So ist das Ergebnis damit identisch, als ob man mit den Gesamtflüssen ϕ und ϕ' rechnen würde. Auch für die Grenzfälle stimmt das Ergebnis. Lassen wir nämlich $\mu_r \rightarrow 1$ gehen, so folgt $L'/L = 1$ und bei $\mu_r \rightarrow \infty$ ergibt sich $L'/L = 2$.

Somit können wir die Gesamtinduktivität des Kopfes berechnen:

$$L_{\text{ges}} = L_1(\mu_r) + L_2(\mu_r) + L_3 + L_4(\mu_r)$$

L_1 ist dabei die aus dem Transmission-Line-Modell ermittelte Induktivität. Die in den obigen Überlegungen gewonnene Induktivität findet sich flächenanteilmäßig in L_2 wieder. L_3 umfaßt die Induktivität der Gehäuseanschlüsse des Kopf-IC's, und in L_4 sind alle vorher nicht erfaßten Induktivitäten berücksichtigt, wie z.B. die in Mumetall ausgeführte Leitungsrückführung von der Spiralspulenmitte zum Anschlußpad und die Induktivitäten der Anschlüsse zwischen dem Verstärkerbaustein, dem Zusatzkondensator C' und dem Sockel für den Kopf-IC. Gehen wir davon aus, daß dieses L_4 nur eine geringe Abhängigkeit von μ_r besitzt, können wir aus L_1 , L_2 und der gemessenen Induktivität annähernd das μ_r berechnen. Es beträgt ca. 85 bei 70 MHz, da aus dem 3. Kapitel bekannt ist, daß es wegen der Wirbelströme und der Spinrelaxation frequenzabhängig ist. Benutzt man die dort aufgestellten Formeln, so gewinnt man durch numerische Berechnung die An-

fangspermeabilität $\mu_i = \text{ca. } 125$. Dieser Wert erscheint zunächst sehr niedrig, doch es wurde in 3.1 schon darauf hingewiesen, daß bei hohen Frequenzen (ab ca. 10 MHz) sehr große μ_r wegen des starken Abfalls wenig sinnvoll sind (siehe Abb. 3-5).

Abschließend sei noch erwähnt, daß wieder bei diesen Betrachtungen Sättigungseffekte, die eine weitere Reduzierung der Permeabilität zur Folge haben, nicht mitberücksichtigt wurden.

5.3 Schreib- und Leseigenschaften

Die hierzu durchgeführten Messungen sind in zwei Gruppen eingeteilt. Dabei wurde im ersten Fall noch ohne Speichermedium gearbeitet. Erst danach erfolgte die Ermittlung von Kopfeigenschaften in einem Experimentier-Diskettenlaufwerk. Doch zunächst soll auf das mediumlose Verfahren eingegangen werden.

5.3.1 Mediumloses Verfahren

Es erschien sinnvoll, ein einfaches Testverfahren zu finden, mit dem es möglich ist, die Köpfe auf ihre spätere Einsatzfähigkeit schnell zu überprüfen, wobei zunächst erst qualitative Aussagen gemacht werden sollten. Hier bot es sich an, zwei Magnetköpfe so einander gegenüber zu positionieren, daß der eine als Schreib- und der andere als Lesekopf fungiert. Die Justierung der beiden Köpfe zueinander kann dabei z.B. wie in unserem Fall unter einem Mikroskop erfolgen. So war es auch möglich, durch Einstellung definierter Abstände die "Fernwirkung" des magnetischen Kopfwechsselfeldes zu ermitteln.

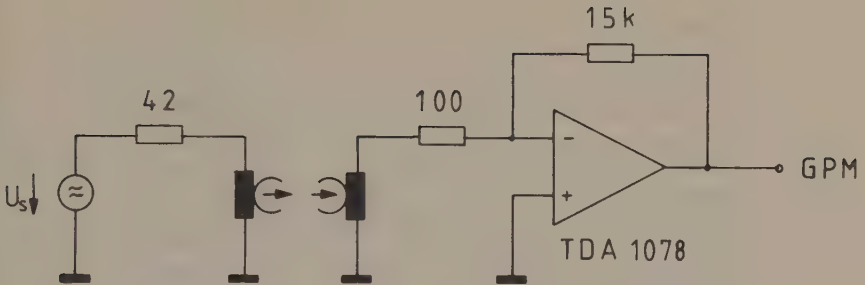


Abb. 5-6: Meßschaltung zur Bestimmung der induzierten Spannung im Lesekopf (GPM: Gain-Phase-Meter)

Sämtliche Messungen wurden mit der in der Abb. 5-6 gezeigten Schaltung durchgeführt. Als Stromtreiber für den Schreibkopf diente ein einstellbarer Sinusgenerator (Tektronix SG 503). Da direkt am Kopf über eine Stromzange der durch die Windungen fließende Strom ermittelt wurde, konnten die durch die Induktivität und Kapazität des Kopfes und der Zuleitungen verursachten Blindwiderstände unberücksichtigt bleiben. Die Frequenzabhängigkeit der Stromzange ist im Bereich von 0,25 bis 10 MHz sehr klein, wie eine Messung gezeigt hat, und wurde daher bei der Meßauswertung vernachlässigt.

Die im Lesekopf hervorgerufene Induktionsspannung wurde in einem Videoverstärker (TDA 1078) um den Faktor 100 verstärkt. Auch hier ergaben Kontrollmessungen, daß die Verstärkung im betrachteten Frequenzbereich weitgehend konstant war. Daher blieben die noch auftretenden kleinen Änderungen unberücksichtigt. Der Vergleich zwischen Schreibstrom und induzierter und verstärkter Spannung erfolgte mit einem Gain-Phase-Meter (HP 3575A). Um eine kapazitive Signalüberkopplung weitgehend zu verhindern, wurde bei den Messungen eine ca. 10 μm dicke, auf Massepotential liegende Aluminium-

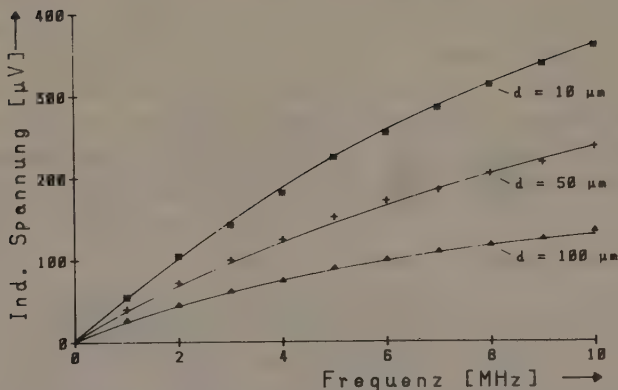


Abb. 5-7: Frequenzabhängigkeit der induzierten Lesespannung bei verschiedenen Kopfabständen d

folie zwischen dem Schreib- und Lesekopf eingeschoben.

Die gemessene Abhängigkeit der Induktionsspannung von der Frequenz ist in der Abb. 5-7 dargestellt. Man erwartet dabei eine Gerade, die auch annähernd erreicht wird, da die Induktionsspannung U_{ind} proportional der Frequenz f ist. Bei anderen Abständen zwischen den beiden Köpfen und auch bei anderen Köpfen war die gleiche Abhängigkeit vorhanden. Noch interessanter ist jedoch das Verhalten von U_{ind} , wenn man bei konstanter Frequenz und konstantem Schreibstrom den Abstand zwischen den beiden Köpfen variiert. Wir können diese Ortsabhängigkeit aus den Abbildungen 5-8 entnehmen. Dabei ist in b) zusätzlich eine parallele Verschiebung in der Spulenebene vorgenommen worden.

Wie kann man sich den Verlauf in a) erklären? Das vom Spalt hervorgerufene Magnetfeld (Karlquist-Feld) ist bekanntlich bei kleiner Spaltlänge nur sehr kurzreichweitig, was jedoch beim Vergleich mit den Meßdaten im vorliegenden

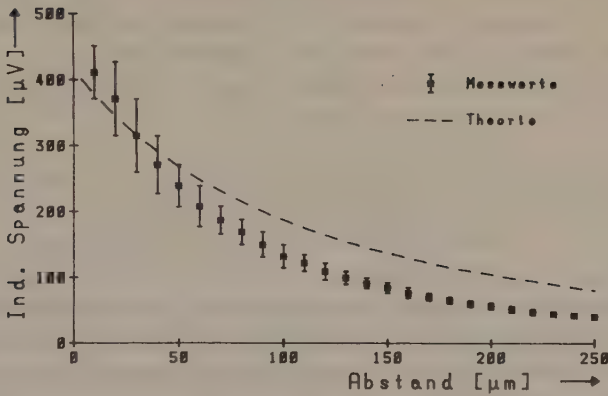


Abb. 5-8a: Abfall der Induktionsspannung mit steigenden Kopfabständen ($f = 10$ MHz)

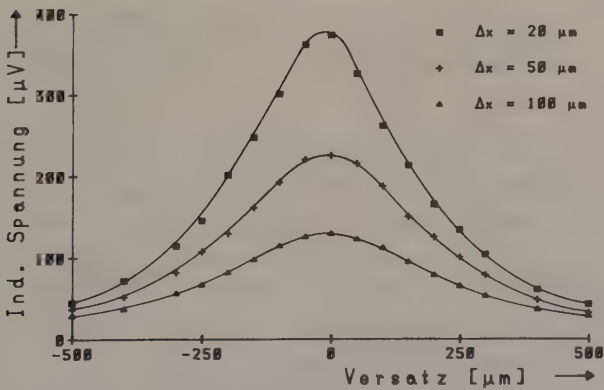


Abb. 5-8b: Einfluß des seitlichen Kopfversatzes auf die Induktionsspannung bei verschiedenen Kopfabständen Δx ($f = 10$ MHz)

Fall nicht stimmt. Es könnte aber auch der hinten nicht mit einem Magnetjoch abgedeckte Teil des Kopfes einen Beitrag leisten. Um dies zu beweisen, betrachten wir wieder die im vorigen Abschnitt schon behandelte Spiralspule.

In /45/ ist das Vektorpotential einer solchen Spule mit

$$A_{\varphi}(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} * \int_{r_0}^{r_1} \int_0^{2\pi} \frac{i_{\varphi}(r_k) * r_k * \cos \varphi}{\sqrt{r^2 + r_k^2 - 2 * r * r_k * \cos \varphi}} * d\varphi * dr_k$$

angegeben. Durch die Lage der Spule in der r - φ -Ebene (Zylinderkoordinatensystem) sind die beiden anderen Komponenten von A (A_r und A_z) null. Im Abstand d von dieser Spule befindet sich nun eine zweite Spiralspule (Lesespule) mit n Windungen (siehe Abb. 5-9). Der Anteil des Flusses ϕ , der

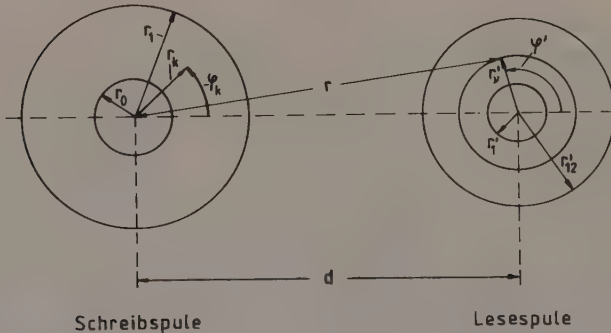


Abb. 5-9: Schreib- und Lesespule in der r - φ -Ebene
(Näheres siehe im Text)

von der Schreibspule erzeugt wird und die von der γ -ten Windung der Lesespule eingeschlossene Fläche durchdringt, ergibt sich mit der Beziehung

$$\phi_v = \oint \vec{A} * d\vec{r}_v$$

zu

$$\phi_v = \int_{\varphi'=0}^{\varphi'=2*\pi} A_{\varphi}(r) * (\vec{e}_{\varphi} * \vec{e}_{\varphi'}) * r_v' * d\varphi'$$

mit

$$r = \sqrt{(d+r_v' * \cos \varphi')^2 + r'^2 * \sin^2 \varphi'}$$

$$(\vec{e}_{\varphi} * \vec{e}_{\varphi'}) = (r_v' + d * \cos \varphi') / r$$

und $A_{\varphi}(r)$ wie oben angegeben

Ändert sich zeitlich das Vektorpotential A_{φ} (hervorgerufen durch eine Stromänderung in der Schreibspule), so wird in der Lesespule die Spannung

$$U_{ind} = \frac{d}{dt} * \sum_{v=1}^{12} \phi_v$$

induziert.

Die numerische Berechnung ergibt den in der Abb. 5-8a zusätzlich eingetragenen Verlauf. Auffallend dabei sind die Abweichungen bei sehr großen und sehr kleinen Abständen. Dies kann man dadurch erklären, daß der Einfluß der aus weichmagnetischen Material bestehenden Joche nicht mitberücksichtigt worden ist. Durch ihre teilweise abschirmende Wirkung (hier speziell der "Schreibspule") erreicht der theoretisch berechnete Fluß nicht vollständig die "Lesespule", was sich in der geringeren Induktionsspannung bei großen Abständen niederschlägt. Andererseits spielt bei den kleinen Abständen das vom Spalt hervorgerufene Karlquist-Magnetfeld eine Rolle, weil es zusätzlich einen additiven

Beitrag leistet. Dadurch stimmt die theoretisch ermittelte Kurve hier besser mit den gemessenen Werten überein.

Es sei aber nochmals vermerkt, daß es sich hierbei um eine rein qualitative Abschätzung handelt, da eine exakte theoretische Behandlung unter Berücksichtigung des Einflusses der weichmagnetischen Schichten und der Geometrie des Kopfes - die Spule ist nicht genau spiralförmig - über den Rahmen dieser Arbeit hinausgehen würde. Trotzdem kann man dieses Meßverfahren dazu benutzen, schlechte Kopfexemplare, d.h. mit sehr niedrigen Induktionsspannungen, herauszuselektieren, da diese auch später bei einem Einsatz unbefriedigende Ergebnisse liefern würden. Ursächlich dafür sind häufig kleine Fehler in den Isolationsschichten, die beim Widerstandstest und optisch schwer festzustellen sind.

Viele interessante Eigenschaften eines Kopfes sind mit den bisher behandelten Verfahren nicht zu überprüfen. Hierzu muß man den Dünnschichtmagnetkopf direkt in einem Laufwerk testen, was im folgenden Abschnitt geschehen soll.

5.3.2 Einsatz des Kopfes in einem Diskettenlaufwerk

Bei der hochdichten Magnetaufzeichnung sind sowohl die analogen (Video) als auch die digitalen (Datenspeicherung) Verfahren interessant. Daher galt es bei den im folgenden beschriebenen Experimenten, die Kopfeigenschaften für beide Methoden zu untersuchen.

Die analoge Aufzeichnung wird fast ausschließlich mit Bandmaschinen realisiert, während für die digitale sowohl Laufwerke mit Magnetbändern als auch mit Festplatten und anderen flexiblen Medien (z.B. Disketten) verwendet werden. Im vorliegenden Fall wurden die Versuche (analog und digital) auf einem Experimentier-Diskettenlaufwerk durchgeführt. Bei diesem speziell für Dropout-Untersuchungen an flexiblen magnetischen Datenträgern aufgebauten Laufwerk /47/ besteht

die Möglichkeit, die Umdrehungsgeschwindigkeit von 200 bis 3000 min^{-1} zu variieren. Darüberhinaus können rechnerunterstützt eine Umdrehung lang verschiedene Bitmuster mit einstellbaren Schreibströmen über den Magnetkopf auf die Diskette geschrieben und gelesen werden. Die Lesesignale werden dabei einerseits über ein Oszilloskop ausgegeben und andererseits über einen Analog-Digital-Umsetzer in einen Transientenspeicher übernommen und können dann mit Hilfe eines Rechners weiterverarbeitet werden. Ein zusätzlich installierter Löschkopf garantiert, daß die gewünschten Informationen immer auf gelöschte Spuren geschrieben werden. Der Schreib-/Lesekopf ist dabei normalerweise fest installiert, so daß nur immer die gleiche Spur beschrieben und gelesen

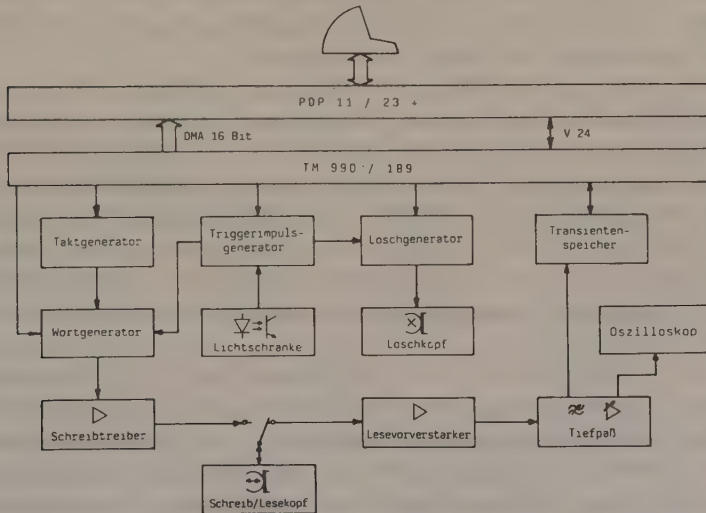


Abb. 5-10: Aufbau des Meßsystems mit dem experimentellen Diskettenlaufwerk /48/

wird. Es besteht jedoch die Möglichkeit, mit Hilfe einer Mikrometerschraube den Kopf manuell um ca. 2 cm zu verschieben, um so die Spur zu wechseln oder z.B. den "Rasen" auszumessen. Die Justierung des Kopfes wird durch eine schwalbenschwanzähnliche Konstruktion bewerkstelligt. Er kann in allen Richtungen verkippt und auch in der Höhe eingestellt werden. Die Justierung erfolgte dabei so, daß eine vorher schon mit einem anderen Kopf (in unserem Fall z.B. einem Videokopf) beschriebene Testspur gelesen und die Einstellung gesucht wurde, bei der man ein maximales Lesesignal erhielt. Als Datenträgermaterial wurden für die Versuche Disketten der Firma BASF verwendet. Zum einen kamen 5 1/4 Zoll Standard FlexyDisks mit einer Koerzitivfeldstärke von 22 kA/m und einer magnetischen Schichtdicke von 2,2 μm , zum anderen 5 1/4 Zoll High Density (HD) FlexyDisks mit einem H_c von 48 kA/m und einer Schichtdicke von 1,4 μm zum Einsatz. Aus der Abb. 5-10 ist noch einmal der Prinzipaufbau der zugehörigen Elektronik ersichtlich.

Bei den analogen Messungen wurde der Wortgenerator und Schreibtreiber durch einen triggerbaren Funktionsgenerator (HP 3312A) ersetzt. Die Auswertung der Lesesignale erfolgte dabei ausschließlich über das Oszilloskop. Für die Untersuchungen wurde ein Filmkopf mit einer Spaltlänge von ca. 0,5 μm als Schreib- und Lesekopf eingesetzt. Geschrieben und gelesen wurde jeweils dabei mit allen 12 Windungen. Die Lesesignale bewegten sich bei den Messungen im Bereich von 0 bis 100 μV .

Die Meßkurve in der Abb. 5-11 gibt gut das Verhalten eines induktiv arbeitenden Lesekopfes wieder. Da die Lesespannung gemäß der Induktionsgesetz-Beziehung $U_L \sim d\phi/dt$ mit wachsender Frequenz ansteigt, erwartet man eine Gerade mit der Steigung von 20 dB pro Dekade ($\hat{=}$ 6 dB/Oktave). Eine Verdoppelung der Disketten-Umdrehungszahl hat ebenfalls eine Erhöhung der Signalamplitude um 6 dB zur Folge. Beides ist deutlich aus dem Diagramm der Abb. 5-11 ersichtlich. Die

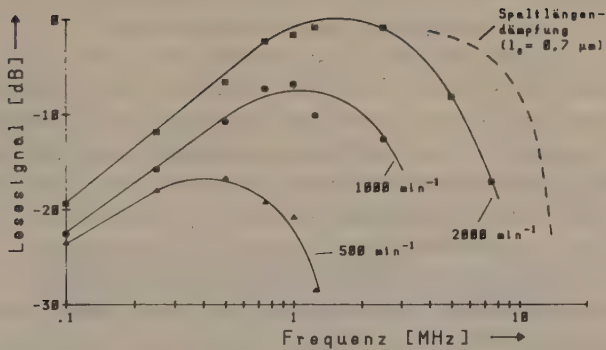


Abb. 5-11: Lesesignal bei verschiedenen Aufzeichnungsfrequenzen und Diskettendrehzahlen (Standard-diskette; Schreibstrom: 50 mA)

relativ stark abfallende Flanke rechts des Maximums kann durch eine Funktion der Form $U_L \sim \sin(x)/x$ ($x = \pi \cdot l_g / \lambda$, l_g = Spaltlänge, λ = Wellenlänge) beschrieben werden. Die erste Nullstelle ergibt sich für $\lambda = l_g$, d.h. wenn der doppelte Flußwechselabstand gerade der Spaltlänge des Kopfes entspricht. Der Wert für λ läßt sich aus der Frequenz f und der Drehzahl n der Diskette nach der Beziehung $\lambda = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot n / f$ (r = Spurradius) ermitteln. Entsprechend verschiebt sich der erste Nulldurchgang bei Änderung der Drehzahl.

Die genaue Bestimmung der Nullstelle war wegen eines zu großen Rauschpegels nicht möglich. Darüberhinaus waren generatorbedingt nur Frequenzen bis 12 MHz realisierbar. Trotzdem kann eine Abschätzung vorgenommen werden. So ergibt sich bei einer Extrapolation der Lesekennlinie (Umdrehungszahl $n = 2000 \text{ min}^{-1}$) eine Spaltlänge von ca. $0,67 \mu\text{m}$. Hierbei handelt es sich jedoch um die sogenannte "effektive"

Spaltlänge, die mit der optisch ausgemessenen nicht identisch ist. Nach Westimijze /49/ ist diese effektive Spaltlänge je nach verwendetem Datenträgermaterial ca. 10 - 20% größer als die optische. In unserem Fall würde sich dann eine Spaltlänge von ca. $0,6 \mu\text{m}$ ergeben, was mit der Messung von ca. $0,5 \mu\text{m}$ unter dem Mikroskop einigermaßen gut übereinstimmt, da das Auflösungsvermögen eines Lichtmikroskops bei dieser Größe nur noch begrenzt ist. Die Spaltdämpfungsfunktion $\sin(x)/x$ ist für $l_g = 0,7 \mu\text{m}$ im Diagramm (Abb. 5-11) als unterbrochene Linie mit eingetragen.

Betreibt man den Magnetkopf bei hohen Frequenzen, d.h. im Bereich beginnender Spaltdämpfung, so ist es wenig sinnvoll, den Schreibstrom groß zu wählen, da, wie aus der Abb. 5-12 zu entnehmen ist, mit wachsendem Strom das Lesesignal abnimmt. Die Hauptursache dafür liegt bei der Magnetisierungsverteilung im Aufzeichnungsmedium. Verantwortlich für die Abnahme ist das entmagnetisierende Feld. Letzteres ist dem treibenden Feld, welches die Schicht magnetisiert hat, entgegengesetzt und schwächt es besonders im Bereich der Flußwechsel. Dies führt zu einer Verbreiterung der Flußwechselzonen, was wiederum eine Verringerung des Lesesignals zur Folge hat. Der Entmagnetisierung kann man durch Verkleinern der Schichtdicke und durch den Übergang auf höherkoerzitive Medien entgegenwirken /32/. Das letztere kann auch das Kurvenverhalten in der Abb. 5-13 erklären. Hier wurde neben der Standarddiskette eine HD-Diskette verwendet. Im Bereich der Spaltlängendämpfung ist bei gleichem Schreibstrom ein Lesesignalgewinn bis zu 10 dB möglich, wohingegen bei niedrigen Frequenzen ein Verlust von ca. 6 dB in Kauf genommen werden muß, falls man die HD-Diskette benutzt. Durch die höhere Koerzitivfeldstärke wird in der Tiefe keine totale Magnetisierung des Mediums erreicht, was sich bei niedrigen Frequenzen nachteilig, jedoch bei hohen Frequenzen vorteilhaft auf das Lesesignal auswirkt. Es läßt sich somit bei hohen Frequenzen ein optimaler Schreibstrom finden, bei dem

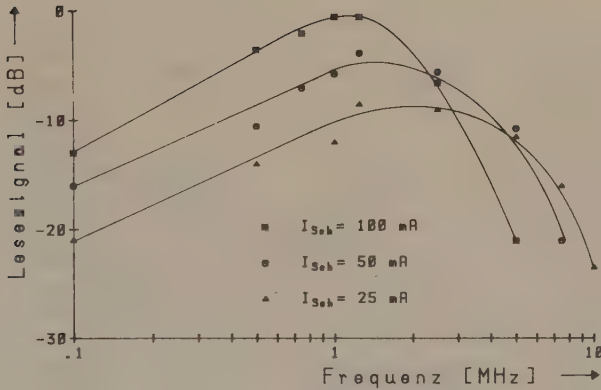


Abb. 5-12: Lesesignal bei verschiedenen Aufzeichnungsfrequenzen und Schreibströmen (Standarddiskette; 2000 min⁻¹)

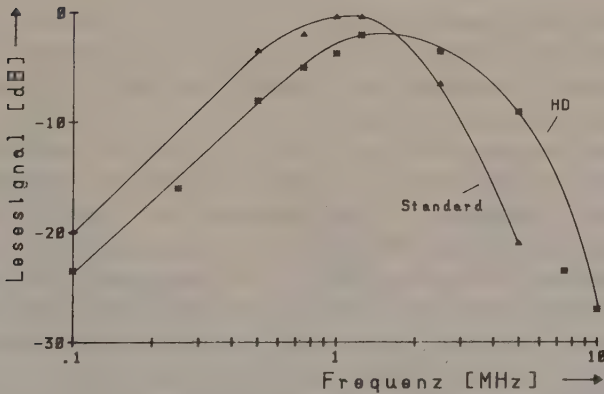


Abb. 5-13: Lesesignal bei der Standard- und HD-Diskette für verschiedene Aufzeichnungsfrequenzen (Schreibstrom: 100 mA; 2000 min⁻¹)

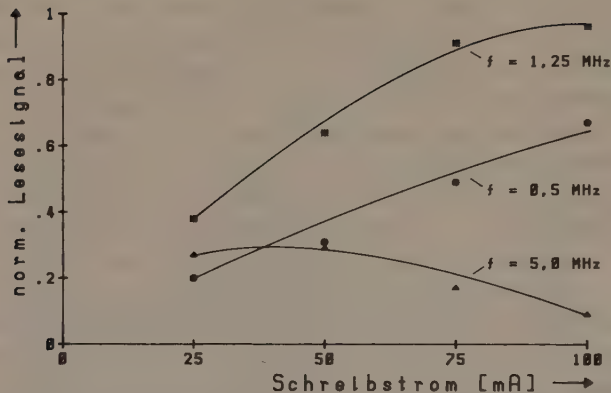


Abb. 5-14: Lesesignal in Abhängigkeit vom Schreibstrom bei verschiedenen Frequenzen (Standarddiskette; 2000 min⁻¹)

das Lesesignal maximal wird. Bei tieferen Frequenzen ist dies nicht zu beobachten, d.h. hier kann mit einem hohen Strom gearbeitet werden. Die Kurven in der Abb. 5-14 veranschaulichen dies noch einmal.

Bei den Digitalmessungen wurde der bisher verwendete Funktionsgenerator durch den ursprünglich im Meßaufbau (Abb. 5-10) integrierten Wortgenerator mit nachfolgendem Schreibtreiber ersetzt. Während die Lesesignale in den nächsten Diagrammen wieder am Oszilloskop dargestellt und dann ausgewertet wurden, erfolgte bei den restlichen Darstellungen (Abb. 5-20 bis 5-22) - hier jedoch mit einem anderen Dünnfilmkopf - die Ausgabe nach Signaldigitalisierung und Speicherung über den Rechner auf den Plotter. Zur Aufzeichnung gelangten Rechteckimpulse verschiedener Frequenzen, um bei gleichbleibender Diskettenumdrehungszahl unterschiedliche Datendichten zu erreichen. Auch diesmal wurden sowohl

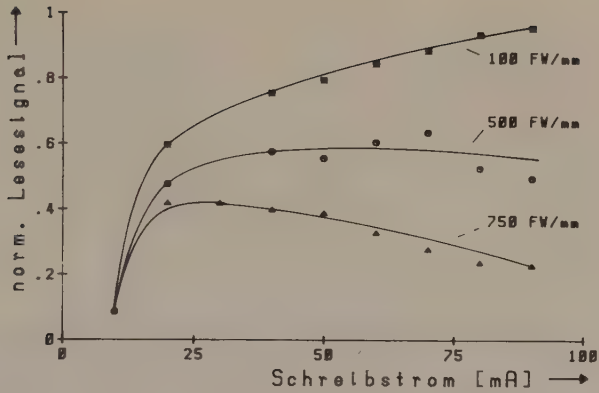


Abb. 5-15: Einfluß des Schreibstromes auf das Lesesignal bei verschiedenen Aufzeichnungsdichten (Standarddiskette; 2000 min⁻¹)

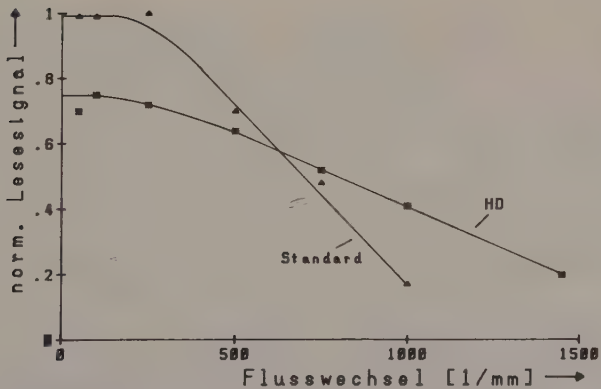


Abb. 5-16: Einfluß der Diskettenwahl auf das Lesesignal (Schreibstrom: 50 mA; 2000 min⁻¹)

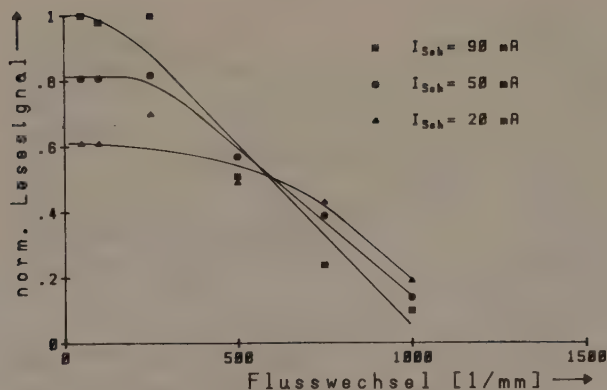


Abb. 5-17: Einfluß der Wahl des Schreibstromes auf das Lesesignal (Standarddiskette; 2000 min⁻¹)

beim Schreiben als auch beim Lesen alle 12 Windungen des Kopfes benutzt.

Die Abb. 5-15 zeigt für drei verschiedene Aufzeichnungsdichten den Einfluß des Schreibstromes auf das Lesesignal. Wie bei den analogen Messungen schon festgestellt worden ist, gibt es auch hier einen von der Aufzeichnungsdichte abhängigen optimalen Schreibstrom, bei dem man ein maximales Lesesignal erhält. Dieser betrug in diesem Fall bei einer Dichte von 750 Flußwechsel (FW) pro Millimeter ca. 25 mA. Aus den nächsten beiden Abbildungen 5-16 und 5-17 entnimmt man wiederum, daß es bei hohen Aufzeichnungsdichten vorteilhaft ist, zum einen ein Medium mit einer hohen Koerzitivfeldstärke auszuwählen und zum anderen mit keinem allzu großen Strom zu schreiben. Die dafür verantwortlichen Ursachen wurden schon bei den Analogmessungen geschildert.

Betrachten wir als nächstes die Form der Lesesignale. Bei idealen Verhältnissen erwartet man positive und negative

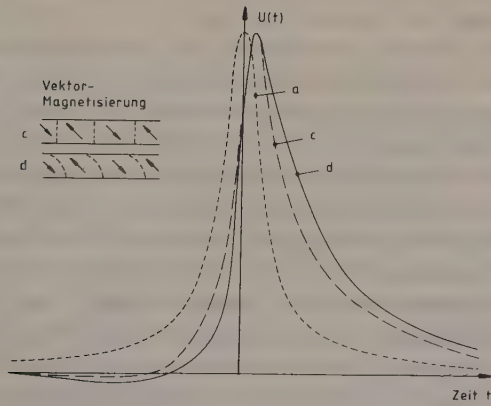
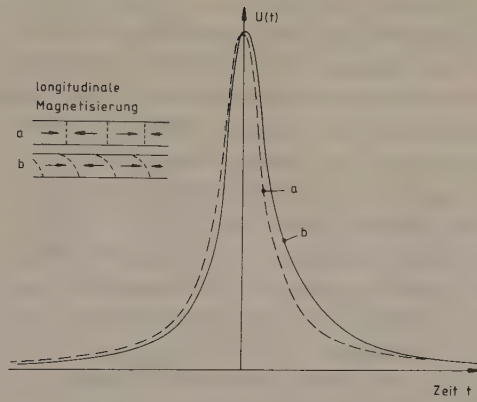


Abb. 5-18: Einfluß der longitudinalen und Vektormagnetisierung auf die Pulsform des Lesesignals /2/

Nadelimpulse, wenn mit rechteckförmigem Strom gearbeitet wird. Da der Generator jedoch keine ideale Stromquelle ist und der Magnetkopf neben dem ohm'schen auch zeitabhängige Widerstände induktiver und kapazitiver Art besitzt, tritt, schon wegen des langsamer ansteigenden wirksamen Stromes in den Spulenwindungen beim Beschreiben des Speichermediums, eine Verbreiterung der vom Kopf magnetisierten Gebiete auf. Darüberhinaus führt das entmagnetisierende Feld in der Magnetschicht zu einer weiteren Ausdehnung der Flußwechselzonen. Das Ergebnis ist dann eine Kurve, wie sie gestrichelt in der Abb. 5-18 dargestellt ist. In Wirklichkeit erhält man jedoch eine andere Lesekurve (durchgezogene Linie im unteren Bild der Abb. 5-18). Sie zeigt ein asymmetrisches Verhalten und eine Verschiebung des Pulsmaximums. Ursächlich dafür sind die im Medium schräg liegenden Flußwechselzonen und die sogenannte Vektormagnetisierung /2/.

Nach einer Untersuchung von G.E. Roberts /50/ kann durch die Position des Kopfes in Bezug auf die Bewegungsrichtung des Speichermediums die Form der Lesesignale beeinflusst werden. In unserem Fall wurden die in der Abb. 5-19 angegebenen vier Fälle betrachtet, wobei die Ergebnisse in der nächsten Abbildung (Abb. 5-20) zu finden sind. Um den Kurvenverlauf besser erkennen zu können, sind zusätzlich in die Abtastwerte (Punkte) Approximationskurven gelegt worden. Wie aus dem Diagrammen hervorgeht, kann das von Roberts vorhergesagte Asymmetrieverhalten (Asymmetrie bei den Fällen 2 und 3 und minimale Asymmetrie bei den Fällen 1 und 4) hier in etwa bestätigt werden. Es zeigt sich aber - im Gegensatz zu Roberts wurde hier der Kopf nicht als Flugkopf benutzt - , daß der Effekt nicht sehr stark ausgeprägt ist und somit eine longitudinale Magnetisierung der Speicherschicht vorherrscht, d.h. daß die Vektormagnetisierung nur gering ist. Hauptsächlich die Lage der Flußwechselzonen dürfte die beobachtete Signalasymmetrie verursachen.

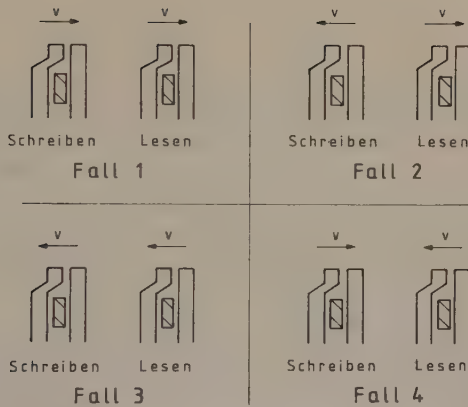


Abb. 5-19: Die vier betrachteten Fälle beim Schreiben und Lesen bzgl. der Kopfposition gegenüber dem Medium (v = Bewegungsrichtung des Mediums)

Die halbe Pulsbreite PW_{50} beträgt bei einem Schreibstrom von 90 mA und einer Drehzahl von 2000 min^{-1} auf der Standarddiskette $0,35 \mu\text{s}$ entsprechend $3,5 \mu\text{m}$ und auf der HD-Diskette $0,2 \mu\text{s}$ entsprechend $2 \mu\text{m}$. Die größere Breite bei der Standarddiskette wird durch den hohen Schreibstrom und das niedrigere H_c verursacht.

Bei den eben betrachteten Lesesignalen handelt es sich quasi um Einzelimpulse. Sie können durch eine kleine Aufzeichnungsichte (hier speziell 10 FW/mm) erreicht werden, wobei dann sichergestellt ist, daß sich die Impulse nicht gegenseitig beeinflussen, d.h. zwischen ihnen ist das Lesesignal, abgesehen vom Rauschen, für eine gewisse Zeit (meist größer als die Pulsbreite) null. Bei hohen Aufzeichnungsichten erwartet man ein ganz anderes Verhalten, da sich hier zwei nebeneinanderliegende Leseimpulse sicherlich beeinflussen werden. Darüberhinaus ist natürlich auch die Form und die Amplitudengröße wichtig, da man aus ihnen Aussagen

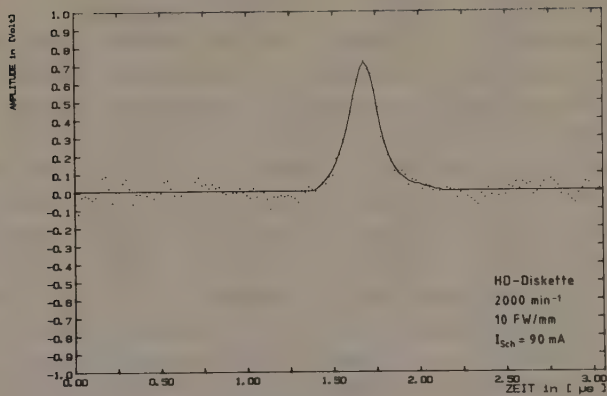


Abb. 5-20a: Symmetrisches Lesesignal (Fall 1)

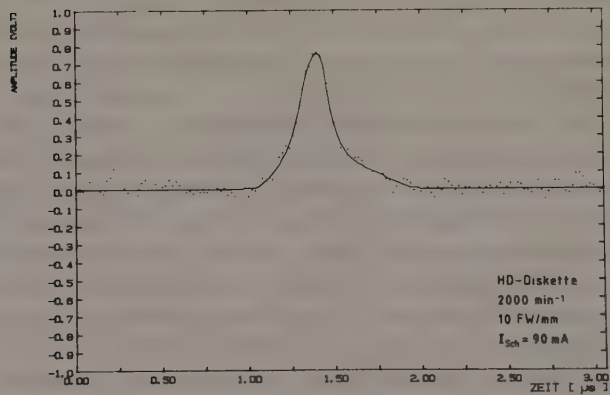


Abb. 5-20b: Asymmetrisches Lesesignal (Fall 2)

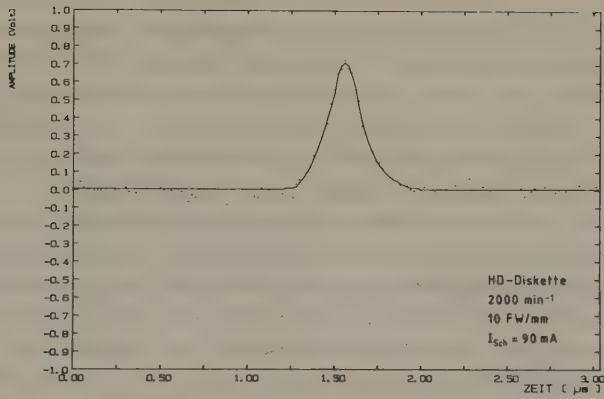


Abb. 5-20c: Asymmetrisches Lesesignal (Fall 3)

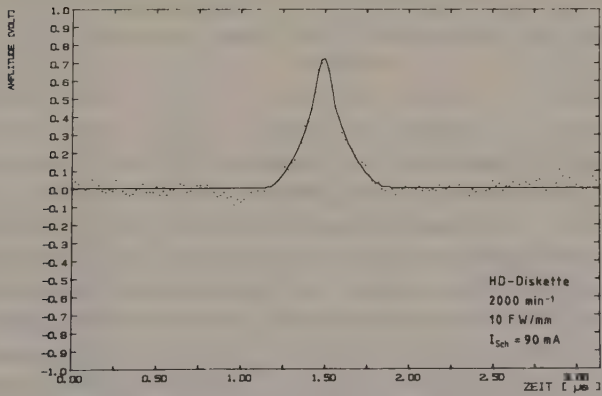


Abb. 5-20d: Symmetrisches Lesesignal (Fall 4)

erhält, bis zu welcher Aufzeichnungsdichte der Kopf einsatzfähig ist.

Hierzu sind in den Abbildungen 5-21a bis d die Lesesignale vier verschiedener Aufzeichnungsdichten (500, 1000, 2000 und 3000 FW/mm) dargestellt. Zur Anwendung kam ein Datensignal (Bitkombination), das abwechselnd mehrere Flußwechsel der vollen Flußwechselanzahl, entsprechend der doppelten Schreibfrequenz ($2f$), und der halben Anzahl, entsprechend der einfachen Schreibfrequenz ($1f$), verwendete. Es wurde dabei ein direktes Aufzeichnungsverfahren ohne Codierung verwendet und der Schreibstrom so gewählt, daß das Verhältnis Leseamplitude ($2f$) zu Leseamplitude ($1f$), das ja die Auflösung zwischen der einfachen und der doppelten Schreibfrequenz angibt, möglichst groß wurde. Um die durch das Rauschen bedingten Spannungsspitzen etwas zu eliminieren, wurden die dargestellten Lesesignale tiefpaßgefiltert, wodurch auch die spätere elektronische Signalaufbereitung erleichtert wurde.

Aus den Diagrammen erkennt man, daß mit dem Dünnfilmmagnetkopf Aufzeichnungsdichten von 2000 FW/mm bei einer Auflösung von ca. 40% durchaus realisierbar sind. Läßt man eine Auflösung von 20% noch zu, so können mit dem Kopf sogar lineare Dichten von bis zu 3000 FW/mm erreicht und ausgewertet werden.

Zwischen der häufig angegebenen Bitdichte und der Flußwechseldichte besteht ein Zusammenhang. Wählt man wie in unserem Fall zur Aufzeichnung das normalerweise in der Datentechnik nicht benützte Verfahren der direkten Aufzeichnung, d.h. eine "1" bedeutet positiven Schreibstrom und eine "0" negativen Schreibstrom, so ist bei einer abwechselnden Bitfolge von "0" und "1" die Flußwechseldichte gleich der Bitdichte. Bei anderen Verfahren, z.B. der MFM-Methode (Modified Frequency Modulation /11/), einem selbsttaktierenden Verfahren, das häufig bei der digitalen Speicherung auf Magnetplatten angewendet wird, können ähnliche Beziehungen

zwischen Bit- und Flußwechseldichte abgeleitet werden.

Um eine hohe Flächenspeicherdichte zu erhalten, ist es erforderlich, neben einer großen linearen Bitdichte auch möglichst viele Spuren auf dem Datenträger unterzubringen. Letzteres ist mit der Spurbreite des Kopfes verknüpft. In unserem Fall betrug die Breite des Joches im Bereich des Spaltes 50 μm . Theoretisch könnte man mit dem Kopf 20 Spuren pro Millimeter beschreiben. Hierbei würde jedoch das seitlich aus dem Kopfspalt austretende Streufeld nicht mitberücksichtigt werden. Dieses verursacht natürlich, bis zu einer gewissen Entfernung, eine unerwünschte Magnetisierung des Speichermediums. Man nennt ihn den "Rasen", der dann später zwischen zwei Spuren gewissermaßen als Sicherheitszone liegt. Diese Zwischenzone ist einerseits notwendig, um ein Übersprechen von einer Spur auf die andere zu vermeiden, andererseits bietet sie eine gewisse Sicherheit, falls von der Mechanik her die Kopfpositionierung auf die betreffende Spur ungenau wäre und so z.B. die Überlagerung der Signale zweier Spuren gelesen würde.

Wie stark sich die durch das seitliche Streufeld hervorgerufene Magnetisierung in unserem Fall ausgewirkt hat, zeigt die Abb. 5-22. Die Kurve wurde für eine Flußwechseldichte von 100 mm^{-1} und einem Schreibstrom von 50 mA auf der Standarddiskette ermittelt. Arbeitete man mit anderen Schreibströmen oder der HD-Diskette, so waren nur geringfügige Abweichungen festzustellen, die meist in der Größe der Meßgenauigkeit lagen. Man sieht jedoch, daß das Übersprechen nicht sehr stark ausgeprägt ist. Verzichtet man auf die Sicherheitszone, so muß man mit einem Übersprechsignal von ca. -15 dB gegenüber dem Nutzsignal rechnen. Extrapoliert man die Meßkurve, so ergibt sich bei einem Spurabstand (Spurmitte zu Spurmitte) von 70 μm ein Restsignal von -40 dB.

Im ersten Fall, also ohne Zwischenzone, erhält man bei einer linearen Bitdichte von 2000 Bit/mm (3000 Bit/mm) eine

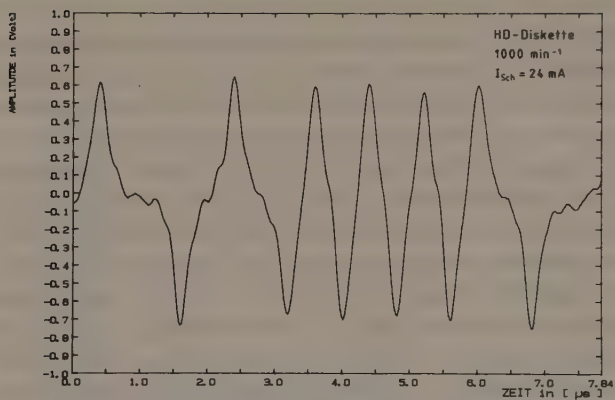


Abb. 5-21a: Lesesignal bei 500 Flußwechsel pro Millimeter

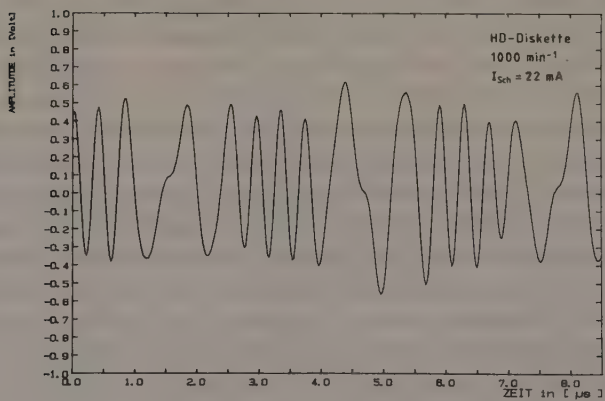


Abb. 5-21b: Lesesignal bei 1000 Flußwechsel pro Millimeter

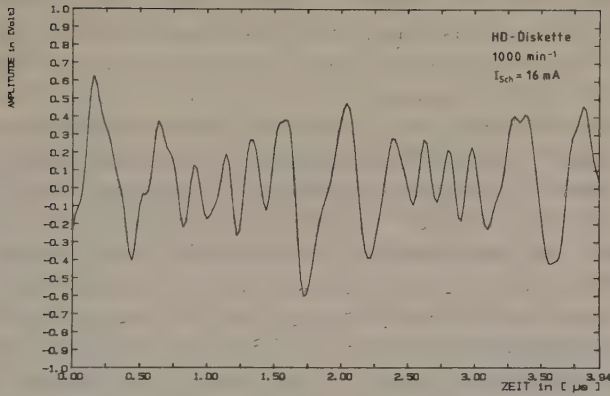


Abb. 5-21c: Lesesignal bei 2000 Flußwechsel pro Millimeter

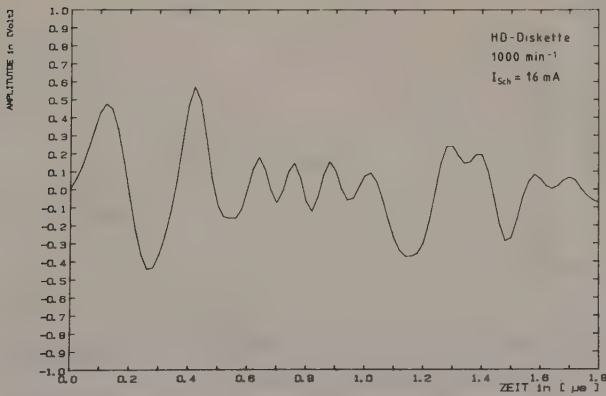


Abb. 5-21d: Lesesignal bei 3000 Flußwechsel pro Millimeter

Flächendichte von $4 \cdot 10^4$ Bit/mm² ($6 \cdot 10^4$ Bit/mm²) und im zweiten von $2,8 \cdot 10^4$ Bit/mm² ($4,2 \cdot 10^4$ Bit/mm²). Durch eine Verkleinerung der noch verhältnismäßig großen Spurbreite des Kopfes können diese schon hohen Dichtewerte weiter gesteigert werden. Zum Vergleich sei auch der neueste Plattenspeicher IBM 3380-E erwähnt, der eine Flächendichte von 37800 Bit/mm² bietet /51/. Er liegt damit mit seinen Werten sogar etwas unter den in unserem Fall erreichten, wobei, wie schon erwähnt, die Verkleinerung der Spurbreite - im Gegensatz zum vorliegenden System mit 14 bzw. 20 Spuren/mm arbeitet das IBM-System mit 63 Spuren/mm - hier sicherlich noch einen Faktor 2 bis 3 bringen würde. Demnach sind bei einer Spurdichte von z.B. 28 Spuren pro Millimeter und einer linearen Dichte von 2000 Bit/mm auf einer 5 1/4 Zoll Diskette pro Seite theoretisch ca. 60 MByte speicherbar. Dies entspricht einer Steigerung gegenüber heute üblichen Kapazitäten um den Faktor 50 bis 100.

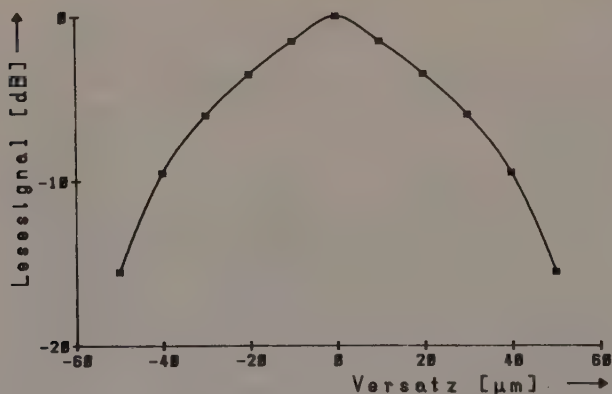


Abb. 5-22: Lesesignale bei Kopf-Fehlpositionierung bzgl. der Schreibspur ("Rasen")
(Standarddiskette; 2000 min^{-1} ; 100 FW/mm;
Schreibstrom: 50 mA)

Diese Daten zeigen, daß der entwickelte und hergestellte induktive Dünnfilmmagnetkopf in der Lage ist, in der hochdichten Magnetaufzeichnung eingesetzt werden zu können, wenn die aufgeführten Werte auch nur im Labor erreicht worden sind.

Interessant ist natürlich auch die Lebensdauer des Kopfes bzw. des Mediums, da es sich hier um ein nicht kontaktfreies Verfahren handelt. Ein guter Kopf-Medium-Kontakt ist deshalb vorhanden, da Schleif- und Polierspuren am Kopfpolspiegel, die eindeutig von der Diskette herrührten, sichtbar waren. Zum Verschleiß wurden keine speziellen Untersuchungen unternommen, doch zeigte eine fünfstündige ununterbrochene Aufzeichnung und Wiedergabe auf der gleichen Spur und mit demselben Kopf bei 2000 min^{-1} keine merkbare Änderung in den Lesesignalen. Es ist jedoch zu vermuten, daß durch die höhere Mediumgeschwindigkeit, dem größeren Flächendruck auf das Medium und die im Kopf verarbeiteten Materialien sich eine kürzere Lebensdauer sowohl der Speicherschicht als auch des Filmkopfes gegenüber herkömmlichen Systemen ergeben wird. Eine genauere Untersuchung dazu wäre sinnvoll.

6 Abschließende Betrachtungen

Nachdem wir uns in den vorangegangenen Kapiteln ausführlich mit dem Entwurf, der Herstellung und dem Test eines induktiven Dünnfilmmagnetkopfes beschäftigt haben, soll in diesem letzten Abschnitt versucht werden, die folgenden Fragen zu beantworten: Welche Möglichkeiten gibt es bei der horizontalen und vertikalen Aufzeichnung, um die Speicherdichte noch weiter zu erhöhen, und wo sind die Grenzen? Außerdem wird die Integration eines Teiles der Schreib-/Leseelektronik in monolithischer Technik direkt neben dem Dünnfilmmagnetkopf vorgeschlagen, um so Verbesserungen hinsichtlich der Signalaufbereitung zu erhalten.

6.1 Grenzen und Verbesserungen bei der Horizontal- und Vertikalaufzeichnung mit Dünnfilmmagnetköpfen

In der heutigen Informationsgesellschaft wird die Forderung nach immer größerer Schnelligkeit und kleineren Rechnern bei vergrößerter Speicherfähigkeit laut, um die anfallenden hohen Daten-Flüsse und -Mengen verarbeiten zu können. Insbesondere die längerfristige Speicherung von Informationen ist dabei interessant. Hier bieten die magnetischen Verfahren eine preisgünstige Methode, um dieser Forderung gerecht zu werden. Die dabei erzielten Fortschritte sind beachtlich. Das in der Abb. 6-1 zu sehende Diagramm soll dies anhand der Entwicklung der IBM-Plattenspeicher von 1957 bis 1985 verdeutlichen. Wird sich diese Steigerung in den nächsten Jahren so fortsetzen? Um diese Frage beantworten zu können, müssen wir noch einmal auf den Magnetisierungsprozeß und dabei insbesondere auf die Wechselwirkung zwischen Magnetkopf und Speichermedium zurückkommen.

Wenden wir uns zunächst den Köpfen zu. Für eine hohe Aufzeichnungsdichte sind dabei folgende Anforderungen an sie

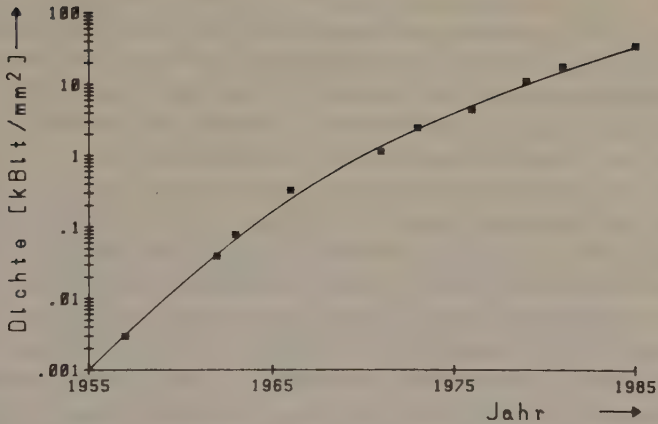


Abb. 6-1: Entwicklung der Flächenspeicherdichte am Beispiel der IBM-Plattenspeicher /51/

zu stellen: kleine Spaltlänge, geringe Polhöhe, niedrige Induktivität, hoher Wirkungsgrad. Dies kann durch kleine Abmessungen und eine entsprechende Werkstoffauswahl realisiert werden, am besten durch die Verwendung von Dünnfilmmagnetköpfen. Durch die großen Fortschritte bei der Miniaturisierung in der Halbleitertechnologie (Strukturierung, Ätzverfahren) sind hier, gegenüber dem vorgestellten, in jedem Fall noch Möglichkeiten der Verkleinerung gegeben. So dürften von der Herstellung her Spaltlängen von $0,1 \mu\text{m}$ - die effektive Spaltlänge wäre dann ca. $0,12 \mu\text{m}$ - und Spurbreiten unter $5 \mu\text{m}$ keine Utopie sein. Theoretisch könnte man dann, natürlich ein "ideales" Speichermedium vorausgesetzt, bei 200 Spuren pro Millimeter ($4 \mu\text{m}$ Spurbreite, $1 \mu\text{m}$ Rassen) und einer Flußwechseldichte von 5 pro Mikrometer eine Flächendichte von 1 MBit/mm^2 erreichen, also ein Faktor 30 gegenüber den heutigen Werten. Probleme dürften bei der Zugriffsmechanik und der Temperaturempfindlichkeit liegen. So muß

die Spur-Kopfpositionierung auf $\pm 1 \mu\text{m}$ genau erfolgen, was sicherlich zusätzlichen Aufwand bedeutet. Der Träger einer Magnetplatte besteht im allgemeinen aus Aluminium, dessen Ausdehnungskoeffizient $2,3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ beträgt. Geht man davon aus, daß bei einer 14 Zoll-Platte der Abstand zwischen der innersten und äußersten Spur ca. 80 mm beträgt, so würde eine Temperaturerhöhung von 3 K den Abstand zwischen innerster und äußerster Spur um ca. $6 \mu\text{m}$, also um mehr als eine Spurbreite, vergrößern. Um die angegebene Dichte zu erreichen, ist somit neben einer mikrometergenauen Feinmechanik auch extreme Temperatur- und Luftfeuchtigkeitskonstanz eine zwingende Voraussetzung. Diese Forderung dürfte, wie auch eine entsprechende Staubfreiheit, keine unüberwindliche Hürde bedeuten, jedoch die folgenden Überlegungen zeigen, daß andere Faktoren eine viel entscheidendere Rolle spielen.

Zum einen betrifft das die Spalttiefe (l_b beim "Jones"-Kopf). Sie ist eine sehr kritische Größe, da sie besonders stark die Kopfeffektivität beeinflusst. Normalerweise sollte man sie möglichst klein wählen. Dies gilt aber nur eingeschränkt, da, falls kein kontaktfreies Aufzeichnungsverfahren gewählt wird, aus Verschleißgründen ein Mindestwert erforderlich ist. Um Spalttiefen von unter $1 \mu\text{m}$ reproduzierbar zu erreichen, sind bei der Polspiegelbearbeitung zusehends Probleme zu erwarten. Dies gilt insbesondere bei Flugköpfen, da sich neben der Spalttiefe zusätzlich der Abstand zwischen Kopf und Medium negativ auf das Lesesignal auswirkt. In modernen Winchester-Laufwerken werden heutzutage Flughöhen bis herab zu $0,2 \mu\text{m}$ erreicht. Allein dieser Abstand d führt nach der "Wallace-Formel" /2/ zu einer Signaldämpfung beim Lesen von 54,6 dB bei $d = 0,2 \mu\text{m}$. Hieraus erkennt man, daß mit Flugköpfen solche hohen linearen Dichten voraussichtlich nicht erreicht werden können, da der Rauschpegel dann größer als das schon kleine Lesesignal sein würde und eine elektronische Auswertung der gelesenen Information nicht möglich wäre. In anderer Hin-

sicht dürften auch Probleme bei den dazu nötigen hohen Schreibfrequenzen auftreten. So ist bei der in Winchesterlaufwerken üblichen Plattendrehzahl von ca. 3600 min^{-1} - diese hohe Drehzahl garantiert erst einen konstanten Abstand zwischen Kopf und Medium - eine maximale Schreibfrequenz von 190 MHz nötig, um auf der Spur mit einem Radius von 10 cm die geforderte lineare Dichte von $5 \text{ FW}/\mu\text{m}$ zu erreichen. Erinnern wir uns an die Resonanzfrequenzmessungen, so wäre der dort behandelte Kopf mit einem f_{res} von 140 MHz ungeeignet. Zusätzlich müßte man einen anderen Werkstoff für das Joch finden, der wegen der Spinrelaxation bei gleichbleibendem μ_r eine höhere Sättigungsinduktion und, wegen der in diesem Frequenzbereich verstärkt auftretenden Wirbelstromverluste, einen größeren elektrischen Widerstand besitzen müßte. Meist geht jedoch, wie z.B. bei den NiFe-Legierungen, eine Erhöhung der Sättigungsinduktion mit einer Koerzitivfeldstärkenvergrößerung einher, was im Betrieb mit einer steigenden Verlustleistung im Kopf verbunden ist.

Einen Ausweg bietet ein Betrieb mit direktem Kopf-Medium-Kontakt. Jetzt könnte man die Mediumgeschwindigkeit so weit verringern, daß man mit der Schreibfrequenz unterhalb der Kopf-Resonanzfrequenz zu liegen kommt. Dabei wird eine Datenflußminderung pro Zeiteinheit in Kauf genommen, die eventuell durch Parallelbetrieb (z.B. Verwendung eines Mehrspur-Dünnschreibkopfes) wieder ausgeglichen werden kann. Aber auch in diesem Fall sollte die Wahl eines anderen Jochmaterials sinnvoll sein, um eine höhere Verschleißfestigkeit zu erreichen. Jedoch dürfte, von der Kopfseite aus betrachtet, die Dichte von $1 \text{ MBit}/\text{mm}^2$, unter Beachtung der angegebenen Randbedingungen, mit einem solchen schleifenden Kopf erreichbar sein.

Bisher sind wir von einem "idealen" Medium ausgegangen. In der Realität sind die Speicherwerkstoffe natürlich auch nicht für eine unbegrenzte Speicherdichte geeignet. Da es sich bei den bisherigen Untersuchungen immer um die horizon-

tale Aufzeichnung gehandelt hat, ist in diesem Zusammenhang wichtig zu wissen, wie lang die magnetisierbaren Partikel (oxidischer oder metallischer Art) des Mediums sind. In jedem Fall muß ihre Länge kleiner als der geringste Abstand zweier Flußwechsel, also in unserem exemplarischen Fall kleiner als $0,2 \mu\text{m}$, sein. Welches Medium erfüllt diese Forderung? Aus der Tabelle 3 kann man entnehmen, daß die oxi-

Material	H_c [kA/m]	T_c [°C]	Länge [μm]	Länge:Dicke
<u>Oxide</u>				
Fe_3O_4	7,2	675	0,2	kubisch
$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	21-32	590	0,2-0,7	5:1-10:1
Co-dotiert	12-64	520	0,25	5:1
Co-eingehüllt	36-64	-	0,1-0,5	5:1-10:1
CrO_2	24-56	119	3-10	10:1-20:1
<u>Metalle</u>				
Fe	84-92	770	0,04	5:1-10:1
FeCo	86	1000	0,1	5:1
Co	168	1120	0,04	3:1
Ni	-	358	-	-
CoNi (82%,18%)	20	-	-	-
CoP (98%,2%)	32	-	-	-

Tabelle 3: Eigenschaften von Partikelmedien
(T_c = Curietemperatur) /2/

dischen Partikelmedien so gut wie nicht geeignet sind, da ihre Partikellängen bis auf wenige Ausnahmen größer als $0,2 \mu\text{m}$ sind. Somit kämen nach der Tabelle nur metallische Partikelmedien wie Eisen oder Kobalt in Frage. Ihre hohen H_c -Werte dürften kein Hindernis sein, da insbesondere bei Dünnfilmköpfen durch die kleine Spaltlänge große Feldstärken erreicht werden können. Auf der anderen Seite sind aus magnetischen Gründen diese hohen Koerzitivfeldstärken sogar für eine große Aufzeichnungsdichte wünschenswert. Zu erwähnen wäre aber noch die etwas schwierige Herstellung solcher Metallpartikelmedien, da sie sehr reaktiv sind und bei Berührung mit der Luft sofort oxidieren und ihre guten magnetischen Eigenschaften verlieren. Der Einsatz eines schleifenden Kopfes dürfte trotz der Schutzschicht und des Schmiermittels des Mediums sich nachteilig auf die Beständigkeit der Metallpartikel auswirken. Abhilfe bietet z.B. ein Betrieb in inerter Gasatmosphäre. Darüberhinaus ist zu beachten, daß bei den hohen Dichten, wie schon erläutert, eine kleinere Speicherschichtstärke sinnvoll und nötig ist. Ein schon geringer Mediumverschleiß hat daher einen frühen Verlust von Information zur Folge. Deshalb sind reine Metallschichten, die normalerweise für eine hochdichte Aufzeichnung bestens geeignet sind, wegen des fehlenden Schmiermittels bei schleifenden Köpfen nicht anwendbar.

Die Überlegungen zeigen aber trotzdem, daß die Dichte von 1 MBit/mm^2 einen Wert darstellt, der durchaus bei entsprechenden Voraussetzungen, hier insbesondere durch den Einsatz sehr rauscharmer Verstärker, mit schleifenden Köpfen erreichbar ist. Es ist somit anzunehmen, daß mit der horizontalen Aufzeichnung sich die heute üblichen Dichten noch weiter erhöhen lassen. Die zunehmend auftretenden Probleme beim Kopf, Medium und insbesondere bei der Wechselwirkung zwischen beiden werden die bisher beobachtete rasante Entwicklung auf diesem Gebiet sicherlich etwas bremsen. In vielen Bereichen jedoch wird das Horizontalverfahren be-

stimmt bis weit in das nächste Jahrhundert verwendet werden.

Die seit Jahrzehnten übliche Aufzeichnungsmethode auf magnetische Träger ist die Längsaufzeichnung, die bisher ausschließlich behandelt wurde. Unter der Annahme, daß die Aufzeichnungsdichte mit dem Horizontalverfahren nicht mehr wesentlich gesteigert werden kann, griff man den Gedanken der magnetischen Senkrechtaufzeichnung wieder auf. Diese Methode wurde nämlich bei den ersten Aufzeichnungsversuchen, lange vor der Längsaufzeichnung, angewendet. Durch intensive Forschung ist es inzwischen gelungen, geeignete Datenträger herzustellen, die so homogen sind, daß sie, gegenüber den bisher verwendeten, theoretisch in der Lage wären, bedeutend mehr Information pro Fläche zu speichern. Laborversuche zur Senkrechtaufzeichnung können mit eindrucksvollen Daten aufwarten, wie es das Diagramm (siehe Abb. 6-2) in einer Arbeit von Iwasaki zeigt /52/.

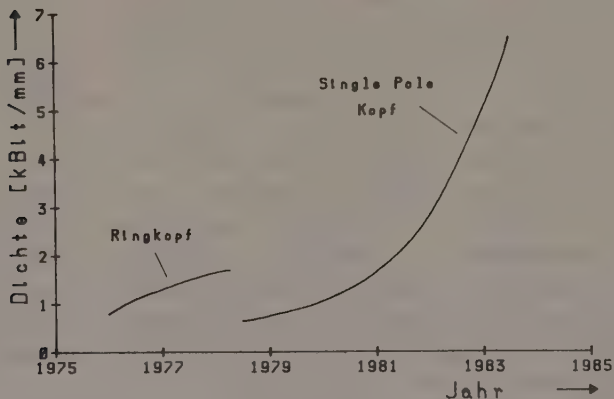


Abb. 6-2: Entwicklung der Aufzeichnungsdichte seit 1975 für flexible Disk-Systeme bei der Senkrechtaufzeichnung /52/

Als Aufzeichnungsmaterialien scheinen sich dabei mehr und mehr CoCr-Legierungen durchzusetzen. Sie haben den Vorteil, daß die magnetischen Werte über das Mischungsverhältnis in sehr weiten Grenzen eingestellt werden können, und daß diese Technik heute sehr gut beherrscht wird. Dabei wurden H_C -Werte von 8 bis 175 kA/m erreicht. Außerdem weisen diese Legierungen teilweise eine sehr ausgeprägte Anisotropie auf, die die Speicherfähigkeit des Materials noch weiter erhöht. Untersuchungen haben ergeben, daß sich für CoCr-Legierungen zwischen den aufgezeichneten Bits eine Domänenstruktur ausbildet, deren Grenzschichtbreite in der Größenordnung von ca. 20 nm liegt /52/. Ohne diese Struktur wäre eine Magnetisierungswechselfrequenz von mehr als 5000 FW/mm nicht möglich. Darüberhinaus wird durch die Anordnung der Domänen das entmagnetisierende Feld minimal, was wiederum eine Stabilisierung der gespeicherten Information zu Folge hat. Bei den bisherigen Untersuchungen hat sich gezeigt, daß ein weichmagnetischer Layer, meist aus NiFe mit waagrechter Vorzugsrichtung, unter der eigentlichen Speicherschicht die Qualität der Senkrechtaufzeichnung wesentlich verbessert. Dies gilt sowohl bei Ringkern- als auch bei speziellen Dünnschichtköpfen für das Vertikalverfahren.

Da, im Gegensatz zur Horizontalaufzeichnung, bei der Senkrechtaufzeichnung der magnetische Kreis zum größten Teil im Speichermaterial verläuft, ist das dem Lesekopf zur Verfügung stehende Feld (Streufeld) sehr gering und das Lesesignal entsprechend klein. Deshalb darf zwischen Kopf und Speichermedium kein großer Abstand bestehen, was bei hochdichter Aufzeichnung damit gleichbedeutend ist, daß überhaupt nur "schleifende" Köpfe dafür geeignet sind. Wie stark diese Abhängigkeit ist, zeigt die Abb. 6-3.

Geeignet für die Senkrechtaufzeichnung sind alle Köpfe, die eine senkrechte Komponente in ihrem Polstreufeld besitzen. Dies gilt auch für den vom Horizontalverfahren her bekannten Ringkernkopf (siehe Abb. 6-4a). Die senkrechte

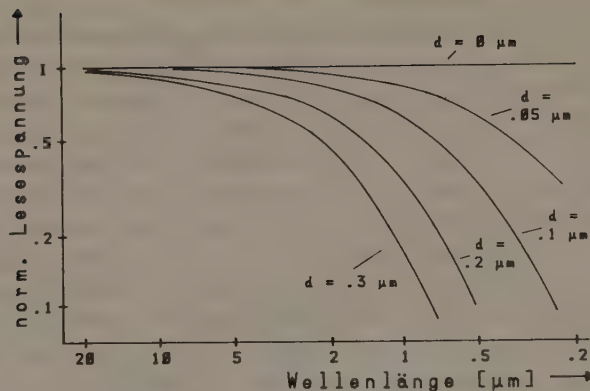
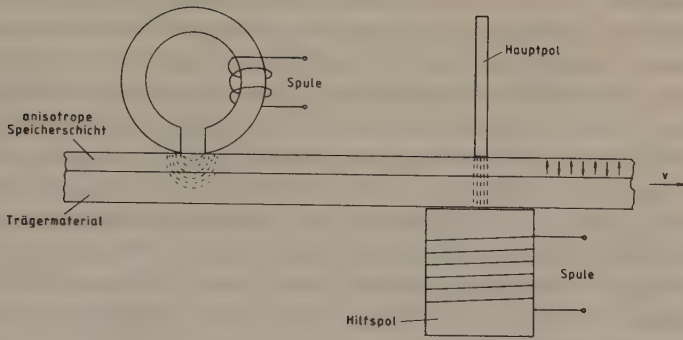


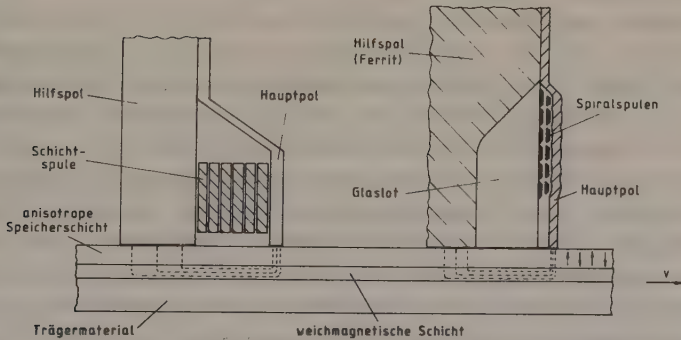
Abb. 6-3: Abhängigkeit der Lesespannung von der Aufzeichnungswellenlänge mit dem Band-Kopf-Abstand als Parameter /53/

Komponente des Kopffeldes ist jedoch relativ schwach, und außerdem werden bei jedem Schreibvorgang zwei Felder mit entgegengesetzter Richtung erzeugt, die nach Abschluß des Schreibvorganges als Magnetisierung im Medium zurückbleiben. Wie Langland und Albert /54/ in einer Arbeit berichteten, sind auf diese Weise mit Hilfe eines Double-Layer-Mediums (CoCr auf NiFe) trotzdem ca. 1400 FW/mm erreicht worden. Eine weitere Steigerung ist durch den Übergang auf induktive Dünnfilmköpfe theoretisch möglich. Die beim Schreiben entstehenden, beiden entgegengesetzten Komponenten dürften den Einsatz eines solchen Kopfes als Schreibkopf für hochdichte Aufzeichnung jedoch als nicht besonders sinnvoll erscheinen lassen. Wie wir später aber noch sehen werden, ist er als Lesekopf bei entsprechender geometrischer Auslegung vielen anderen Kopfformen vorzuziehen, da er das vom Medium ausgehende Streufeld (= entmagnetisierende Feld) relativ gut ausnützt.



a) Ringkopf

b) Senkrechtkopf „Iwasaki“



c) Dünnschichtkopf „Lazarri“

d) Dünnschichtkopf „Aures“

Abb. 6-4: Verschiedene Köpfe, die für Senkrechtaufzeichnung geeignet sind /55,57/

Der in der Abb. 6-4b dargestellte Kopf, mit einem schmalen Hauptpol auf der einen Seite des Speichermediums und einem größeren Hilfspol auf der anderen, ist für das Vertikalverfahren theoretisch eine gut geeignete Lösung. Der Hauptpol legt im wesentlichen durch seine Dicke die maximal erreichbare Aufzeichnungsdichte fest. Darüberhinaus kann auf die NiFe-Hilfsschicht verzichtet werden. Die Tatsache, daß beide Pole auf verschiedenen Seiten des Datenträgers liegen, wirkt aber auch sein Hauptproblem, den Kopf-Medium-Abstand auf, der nun für beide Pole gilt. Um die zur Magnetisierung nötigen Feldstärken aufzubringen, darf er nicht zu groß ausfallen, da das Trägermaterial (z.B. Polyesterfolie beim Band) den Abstand noch zusätzlich erhöht.

Der in der Abb. 6-4c zu findende Magnetkopf (hergestellt in Dünnschichttechnik) wurde von Lazarri entwickelt /55/. Der Hilfspol ist in Form einer Multilayerschicht (Dicke: ca. 10 μm) aus NiFe- und dünnen Oxidschichten hergestellt. Sein Hauptpol besteht aus einer ca. 200 nm dünnen NiFe-Schicht, also ähnlich dem in dieser Arbeit entwickelten Kopf, nur daß die Dicke der Polschuhe extrem unterschiedlich ist. Obwohl ein Aufzeichnungsmedium mit einem weichmagnetischen Sublayer nötig ist, vereinigt dieser Magnetkopf viele Vorteile der vorher beschriebenen Köpfe in sich. So hat das Kopffeld am Hauptpol eine ausgeprägte senkrechte Komponente. Beide Pole liegen auf derselben Seite des Datenträgers, so daß ein guter Kontakt gewährleistet ist. Der niederohmige magnetische Kreis ist nur an zwei Stellen zwischen den Polen und dem NiFe-Sublayer auf einer Länge von jeweils der CoCr-Schichtdicke unterbrochen. Wählt man letztere nicht zu groß - typische Werte liegen unter 0,5 μm - so treten keine Probleme bei der Mediummagnetisierung auf. Durch Verringerung der Dicke des Hauptpoles ist eine Erhöhung der linearen Speicherdichte möglich. Die Gefahr der magnetischen Sättigung dürfte jedoch einer extremen Verkleinerung dessen Schichtdicke eine Grenze setzen. Durch den

vergrößerten Abstand zwischen den beiden Polen wird der magnetische Pfad im Vergleich zum Dünnfilmkopf für Horizontalaufzeichnung verlängert, wodurch Probleme beim Lesen des geringen Streufeldes entstehen. Trotzdem stellt diese Kopfgrundstruktur eine gut realisierbare Möglichkeit für die Senkrechtaufzeichnung dar.

In der Abb. 6-4d ist noch eine Kopfvariante zu sehen. Hier ist die große gewünschte Dicke des Hilfspoles durch eine Ferritsubstratwahl gegeben. Ein ausreichender Abstand zwischen den Polen wird durch eine nicht-magnetische Schicht erreicht. Etwas Ähnliches wurde schon von Kanai et al. /56/, aber im Zusammenhang mit der Horizontalaufzeichnung, vorgeschlagen. Ein Realisierungsversuch mit Hilfe von in Ferrit eingelassenem Glaslot zur Herstellung der oben genannten nicht-magnetischen Schicht für einen Dünnfilmkopf (für Vertikalaufzeichnung) wird in der Arbeit von Aures behandelt /57/. Erwähnenswert ist noch dazu, daß der dort zur Anwendung gelangte Herstellungsprozeß bis auf wenige Änderungen mit dem des im 4. Kapitels dieser Arbeit angegebenen identisch ist.

Wie bei der Horizontal- bestimmen auch bei der Vertikalaufzeichnung der Kopf selbst und der Kopf-Medium-Abstand die Grenzen der Aufzeichnungsdichte. Die Hauptprobleme, wie Sättigung des Hauptpols beim Schreiben und geringe Lesesignale durch das schwächere Streufeld, wurden schon angesprochen. Letzteres dürfte durch die rasante Entwicklung bei den rauscharmen Verstärkern in den Griff zu bekommen sein, während die Sättigungsproblematik nur durch den Einsatz neuer Werkstoffe mit noch höherer Sättigungsinduktion gelöst werden könnte. Daneben muß auch die ausreichende Standzeit von Kopf und Datenträger beachtet werden. Trotz dieser Probleme scheint die bei der horizontalen Aufzeichnung angegebene Flächendichte von 1 MBit/mm^2 (5000 FW/mm; 200 Spuren/mm) durch Verwendung einer Dünnfilmkopf-Kombination, wie sie z.B. in Abb. 6-5 dargestellt ist, durchaus zu erreichen und

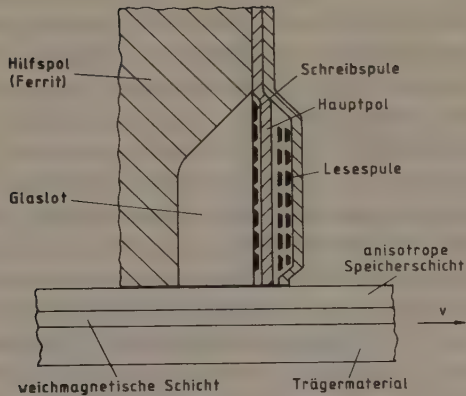


Abb. 6-5: Mögliche Dünnschichtkopfkombination für einen Schreib-/Lesekopf zur Senkrechtaufzeichnung

eventuell sogar zu übertreffen sein. Natürlich sind die schon beim Horizontalverfahren aufgestellten Bedingungen, wie optimaler Kopf-Medium-Kontakt, große Genauigkeit in der Kopfpositionierung etc., auch in diesem Fall für solch hohe Dichten Voraussetzung.

In diesem Abschnitt wurde versucht, anhand einiger Beispiele Grenzen der Horizontal- und Vertikalaufzeichnung aufzuzeigen. Natürlich sind nicht alle Probleme hier zur Sprache gekommen, und so werden sicher immer noch viele Fragen offen bleiben, insbesondere ob z.B. diese Dichten von 1 MBit/mm^2 und mehr unter vertretbarem wirtschaftlichen Aufwand (Nutzen - Kosten) erzielt werden können. Von der wissenschaftlich-technischen Seite aus gesehen dürften diese Werte jedoch sicherlich erreichbar sein.

6.2 Aktiver Dünnschichtmagnetkopf

Der Aufzeichnungs- und Wiedergabekanal besteht bekanntlich nicht nur aus dem Kopf und dem Speichermedium, sondern schließt auch die nachfolgende Schreib-/Lese- und Auswertelektronik mit ein. Mit der Miniaturisierung der Köpfe und den höheren Flächenspeicherdichten geht eine drastische Senkung des Lesesignals einher, da der ausnützbare magnetische Fluß immer geringer wird. Dementsprechend werden an die Elektronik, die dieses Lesesignal aufbereiten soll, höhere Anforderungen als bisher gestellt.

Zum Beispiel werden, wie bei den konventionellen Köpfen, auch die elektrischen Verbindungen zwischen Kopf und Schreib-/Leseverstärker bisher über mehr oder weniger lange Leitungen hergestellt. Somit besteht die Gefahr, daß Einstreuungen von außen die zu lesende Information verfälschen. Zusätzlich hat eine Verkürzung der Leitungen eine Verkleinerung der parasitären Leitungsinduktivitäten und Kapazitäten zur Folge und wird damit die obere Grenzfrequenz des Gesamtsystems erhöhen. Beim Dünnschichtkopf bietet sich nun die Möglichkeit an, kritische Teile der Schreib-/Leseelektronik direkt neben dem Kopf auf dem gleichen Chip zu platzieren, um damit die Leitungen kurz zu halten. Dies könnte zum Beispiel in Hybridtechnik erfolgen, d.h. der Verstärker-IC wird direkt neben dem Kopf auf dem Kopfträgersubstrat fixiert und über kurze Bonddrähte direkt mit ihm verbunden. Wird wie im vorliegenden Fall ein Siliziumwafer als Substrat verwendet, so bietet sich noch eine andere Möglichkeit an. Man kann dann Kopf und Verstärker in monolithischer Technik auf einem Chip integrieren. Ob dabei die ganze Schreib- und Leseelektronik neben dem Kopf mitintegriert wird, muß z.B. wegen des Platzbedarfes von Fall zu Fall entschieden werden. Jedenfalls sollte man aber den Lesevorverstärker unmittelbar neben dem Kopf anordnen, um der wegen der kleinen Lesesignale im μV -Bereich verstärkt auftretenden Gefahr von Störein-

flüssen entgegentreten zu können. Wie würde eine dementsprechende Schaltung aussehen, und was ist beim Entwurf zu beachten?

Da wir es hier mit relativ hohen Frequenzen (Rechteckimpulse bis zu 20 MHz) zu tun haben, dürfte die Ausführung wegen der notwendigen Steilheit der Transistoren in Bipolar-technik empfehlenswert sein. Für die Wahl dieser Technik spricht auch der niedrige Innenwiderstand der Spannungsquelle (Lesekopf), der keinen hohen Vorverstärkereingangswiderstand verlangt. Wegen der Frequenzen im MHz-Bereich müssen der Einfluß von Transistor- und Schaltkapazitäten einerseits und die Frequenzabhängigkeit der Stromverstärkung andererseits beim Schaltungsentwurf mitberücksichtigt werden (Tiefpaßwirkung). Die Frequenzabhängigkeit der komplexen Steilheit $\underline{S} = \underline{I}_C / \underline{U}_{BE}$ und damit der Spannungsverstärkung einer Emitterschaltung kann aus dem Giacoletto-Ersatzschaltbild gewonnen werden. Nach /43/ ergibt sie sich zu $\underline{S} = S / (1 + j\omega \cdot r_{BB'} \cdot C_D)$ und die zugehörige Steilheitsgrenzfrequenz $f_S = r_{BB'} \cdot C_D / (2 \cdot \pi) = 10 \cdot f_T / \beta$ (mit S = Steilheit, β = Stromverstärkung, f_T = Transitfrequenz, C_D = Diffusionskapazität der Basis-Emitter-Diode, $r_{BB'}$ = Basis-Bahnwiderstand), falls die Emitterschaltung mit einer niederohmigen Spannungsquelle, was in unserem Fall ($R_{Kopf} = \text{ca. } 8 \Omega$) gegeben ist, angesteuert wird. Dies Ergebnis gilt auch für die Basisschaltung, weil die Steuerspannung zwischen denselben Anschlüssen liegt. Um eine hohe Bandbreite des Verstärkers zu erhalten, muß man beim Layout unter anderem die von der Technologie abhängigen Größen ($r_{BB'}$, C_D) mitberücksichtigen. Dagegen kann die Wirkung der Schalt- und Transistorkapazitäten teilweise durch eine geeignete Wahl der Verstärkerschaltung beeinflusst werden.

Der Einsatz eines unsymmetrisch betriebenen Differenzverstärkers (T_1 und T_2) in der vorgeschlagenen Schaltung (siehe Abb. 6-6) soll den bisherigen Überlegungen Rechnung tragen. Man kann ihn auch als Verstärker in Basisschaltung mit

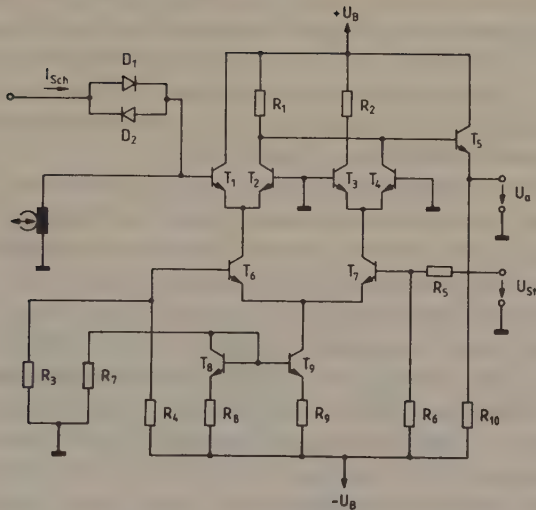


Abb. 6-6: Dünnschichtmagnetkopf mit integriertem Lesevorverstärker und Entkopplungselementen

vorgeschaltetem Emitterfolger betrachten. Der bei der normalen Emitterschaltung auftretende Miller-Effekt (Vergrößerung der Basis-Kollektor-Kapazität um den Faktor der Spannungsverstärkung A) wird hier durch das konstante Kollektorpotential des Transistors T_1 verhindert. Die Basis-Schaltung bestimmt dabei die Steilheitsgrenzfrequenz f_S des Differenzverstärkers, da die Grenzfrequenz des Emitterfolgers oberhalb von f_S liegt. Die Halbierung der Spannungsverstärkung gegenüber der Emitterschaltung wird hauptsächlich durch das günstigere Temperaturverhalten - eine temperaturbedingte Änderung der Basis-Emitter-Spannung wirkt jetzt wie eine Gleichtaktaussteuerung - ausgeglichen. Da zwecks Niedrighaltung des Rauschpegels im Signalzweig möglichst wenige

Transistoren verwendet werden sollten, ist zur Erzielung einer hohen Verstärkung eine Gegenkopplung durch Emitterwiderstände hier wenig sinnvoll. Daher ist am Ausgang des Differenzverstärkers nur noch ein Emitterfolger (T_5) angeschlossen, der gleichzeitig als Impedanzwandler und Leitungstreiber für die Verbindung zum nicht mehr auf dem Chip befindlichen Endverstärker dient.

Im folgenden sollten wir jedoch auch daran denken, daß der Kopf nicht nur zum Lesen, sondern auch zum Schreiben benutzt werden kann. Der dabei am Kopf auftretende Spannungsabfall würde, da er um einige Zehnerpotenzen größer als die Lesespannung ist, zur Übersteuerung des Verstärkers führen. Daher ist beim Schreiben unbedingt eine Entkopplung vom Leseverstärker nötig. In einer Arbeit von D. Seitzer wurde diese Entkopplung durch den Einsatz von Tunneldioden vorgenommen /58/. Da es sich aber bei den Tunneldioden um nur schwer integrierbare Bauelemente handelt, ist das dort vorgestellte Schaltungskonzept in Form einer integrierten Schaltung hier nicht anwendbar. Es wird deshalb ein anderer Weg gegangen. In der Abb. 6-6 ist dazu ein zweiter Differenzverstärker (T_6 und T_7) eingeführt worden, der als Stromumschalter dient. Durch Anlegen einer entsprechenden Steuerungsspannung U_{St} kann schnell zwischen Schreiben (T_7 leitend, T_6 gesperrt) und Lesen (T_7 gesperrt, T_6 leitend) umgeschaltet werden. Durch den Einsatz eines weiteren Differenzverstärkers erhält man an der Basis des Emitterfolgers (T_5) sowohl beim Schreiben als auch beim Lesen - vom durch die nicht ganz identischen Transistoren verursachtem Offset einmal abgesehen - dasselbe Gleichspannungspotential, dem beim Lesen nur noch eine Wechsellspannung, nämlich das verstärkte Lesesignal, überlagert ist. Zu beachten ist aber, daß die an der Basis des Transistors T_1 auftretende "Schreibspannung" nicht zu groß wird. Je nach positiver oder negativer Amplitude würde dann die Basis-Emitter-Diode von T_1 bzw. T_2 im Durchbruch betrieben werden. In unserem Fall kann das bei

einem Schreibstrom von maximal 100 mA, einem Kopffinnenwiderstand von ca. 8Ω und der geringen Induktivität von ca. 160 nH nicht auftreten, da ein Durchbruch erst ab 7 V zu erwarten ist.

Wie beim Schreiben eine Entkopplung von Kopf und Leseverstärker durch den eingeführten Stromschalter erfolgt, so ist umgekehrt beim Lesen auch eine Trennung von Schreibverstärker und Kopf sinnvoll. Wenn man davon ausgeht, daß sich der Schreibtreiber nicht mit auf dem Chip befindet, wirkt die lange Leitung zwischen beiden als Antenne für Störsignale, und zweitens muß die Kapazität der Leitung vom Kopf mit umgeladen werden. Die Aufgabe der Trennung übernehmen die beiden antiparallel geschalteten Dioden. Ihre Diffusions- und Sperrschieichtkapazität sollte dabei möglichst klein sein, um die Schaltzeiten, hauptsächlich durch die Speicherladung hervorgerufen, gering zu halten. Der Einsatz von Schottky-Dioden an dieser Stelle wäre zu empfehlen. Zusätzlich verringert sich durch deren niedrigere Durchlaßspannung die an den Dioden auftretende Verlustleistung. Ihre Durchlaßspannung ist aber noch groß genug, daß die Dioden bei den auftretenden niedrigen Leseamplituden im Mikrovoltbereich wie ein hochohmiger Widerstand (differentieller Widerstand) wirken.

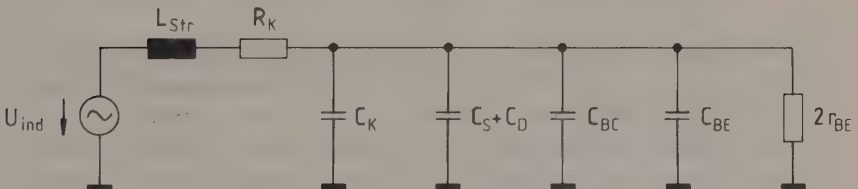


Abb. 6-7a: Ersatzschaltbild für den Lesevorgang
(Erläuterungen in Abb. 6-7b)

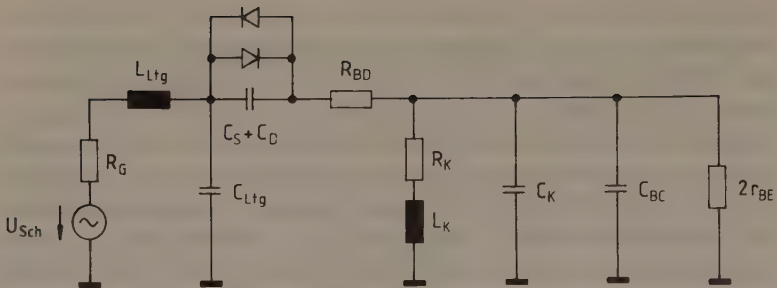


Abb. 6-7b: Ersatzschaltbild für den Schreibvorgang

C_S = Sperrschichtkapazität der Diode;

C_D = Diffusionskapazität der Diode;

C_{BC} = Basis-Kollektor-Kapazität von T_1

C_{BE} = Basis-Emitter-Kapazität von T_1

C_K = Kopf-Kapazität

C_{Ltg} = Leitungskapazität zwischen Schreibtreiber und Kopf

L_K = Kopfinduktivität

L_{Str} = Streuinduktivität

L_{Ltg} = Induktivität der Leitung zwischen Schreibtreiber und Kopf

R_K = ohmscher Widerstand des Kopfes

R_{BD} = Bahnwiderstand der Dioden

r_{BE} = differentieller Eingangswiderstand von T_1)

Die beiden Abbildungen 6-7a und b sollen die Verhältnisse beim Lesen und Schreiben in Form von Kleinsignalersatzschaltbildern mit den teilweise angesprochenen Widerständen, Kapazitäten und Induktivitäten verdeutlichen. Bewußt wurde bei diesem Schaltungsentwurf für einen integrierten Leseverstärker auf eine Dimensionierung verzichtet, da diese sich im wesentlichen nach den von der Technologie vorgegebenen Parametern zu richten hat. Eine Einschränkung ist jedoch

zu machen. Der Strom der Konstantstromquelle (T_8 und T_9) sollte nicht zu hoch gewählt werden, damit der Basisstrom des Transistors T_1 , der auch durch den Kopf fließt, keine unerwünschten Magnetisierungen in dem Speichermedium erzeugt. Nach den im vorigen Kapitel ermittelten Meßdaten würde ein Basisstrom unter $100\text{ }\mu\text{A}$ dieser Einschränkung beim vorgestellten Kopf genügen, da erst ab 10 mA Schreibstrom meßbare Magnetisierungen auf der Diskette erzeugt wurden. Aus diesem Grund und wegen der problematischen Realisierung von Kondensatoren (großer Platzbedarf!) auf dem Chip wurde der zunächst geplante Einsatz eines Koppelkondensators zwischen Kopf und Leseverstärker wieder fallengelassen. Zudem wurde eine verhältnismäßig einfache Schaltung gewählt, um sie später mit der institutseigenen Technologie herstellen zu können.

7 Zusammenfassung

Es wird ein induktiver Dünnschichtmagnetkopf mit 12 Windungen und Mittellanzapfung vorgestellt, der sowohl für digitale als auch analoge Aufzeichnung hoher Dichte geeignet ist.

In einem Einführungskapitel wird neben einer kurzen Behandlung der Magnetaufzeichnungsverfahren ein Überblick über den Stand der Technik bei den Magnetköpfen gegeben. Es zeigt sich dabei, daß, insbesondere bei hohen Speicherdichten, die konventionell hergestellten Magnetköpfe zusehends ihre Leistungsgrenze erreichen. Als Lösung bieten sich integrierte Köpfe an, deren Herstellung in Anlehnung an die Techniken der IC-Technologie erfolgt.

Beim Entwurf des Dünnschichtmagnetkopfes kommt es darauf an, durch eine geschickte Wahl der zu verwendenden Materialien, deren Kombination und einer darauf abgestimmten Geometrie ein Optimum zu finden. Wie theoretische Berechnungen zur Ermittlung des Kopfspaltfeldes, der Induktivität und des Wirkungsgrades zeigen, spielen dabei neben der Permeabilität und Sättigungsinduktion der weichmagnetischen Schichten insbesondere die Länge, die Dicke und der Abstand der beiden Magnetjoche eine bedeutende Rolle. Unter Berücksichtigung der Design-Regeln in der Dünnschichttechnik führen diese Überlegungen zum Layout des Kopfes, der zwei Flachspulen à sechs Windungen besitzt, dessen Spurbreite 50 μm und dessen Spaltlänge 0,5 μm betragen, und der einen Platz von ca. einem Quadratmillimeter in Anspruch nimmt.

Der praktische Teil der vorliegenden Arbeit beginnt mit der Herstellung des Magnetkopfes. Hier erfolgt zunächst die Beschreibung der einzelnen Dünnschichtprozesse für die Magnetjoche, die Spule und die Isolation, deren Strukturierung und Kombination sowie der Aufbau des Kopfes. Dabei auftretende Probleme, wie Haftung, mechanische Spannungen, Unterätzungen etc., werden erläutert und Lösungen aufgezeigt. Mit Hilfe verschiedener Messungen werden die Dicke, Schicht-

qualität, magnetische und elektrische Daten während der Herstellung überwacht. Es schließt sich dann eine Beschreibung der Konfektionierung einschließlich der Kopfspiegelbearbeitung an, wobei letztere für die Funktionsfähigkeit des Magnetkopfes entscheidend ist.

Der zweite Abschnitt im praktischen Teil der Arbeit befaßt sich mit den Messungen an fertiggestellten Kopfexemplaren. Zunächst werden Kennwerte, wie Widerstand, Induktivität und Strombelastbarkeit der Spule ermittelt. Im Anschluß daran erfolgt die Bestimmung der Schreib- und Leseigenschaften der Köpfe. Beim ersten Verfahren werden hierzu zwei Köpfe so gegeneinander positioniert, daß der eine als Schreib- und der andere als Lesekopf dient. Zum zweiten Verfahren muß der Kopf in ein Experimentier-Diskettenlaufwerk eingebaut werden. Hier erfolgt unter verschiedenen Bedingungen der Test analoger und digitaler Aufzeichnung. So ergibt sich, daß mit diesen Dünnsfilmmagnetköpfen beide Aufzeichnungsverfahren möglich sind, und sich lineare Dichten bis zu 3000 Flußwechsel pro Millimeter bei digitaler Aufzeichnung erreichen lassen, wobei mit dem gleichen Kopf geschrieben und gelesen wird.

Am Ende der Arbeit werden Grenzen und Verbesserungen bei den Dünnsfilmköpfen für Horizontal- und Vertikalaufzeichnung diskutiert. Dies geschieht sowohl in Hinblick auf die Herstellung des Kopfes selbst, als auch für die nachfolgende Signalverarbeitung. Hierzu wird ein Vorschlag zu einem "aktiven Dünnsfilmmagnetkopf" vorgestellt, bei dem ein Teil der Schreib-/Leseelektronik in monolithischer Technik mit dem Filmkopf zusammen integriert wird.

Herrn Professor Seitzer möchte ich meinen Dank für die interessante Aufgabenstellung und die Anregungen und Hinweise bei der Durchführung der Arbeit aussprechen.

Herrn Professor Ischauer gebührt mein Dank für die Übernahme der Mitberichterstattung.

Den Firmen BASF AG und Bogen Electronic GmbH danke ich, da sie Teile dieser Arbeit im Rahmen eines BMFT-Forschungsvorhaben mitgefördert haben.

Mein Dank gilt auch der Firma Siemens AG und den Instituten für Werkstoffwissenschaften IV und VI (Frau Burkhardt, Prof. Hubert) für die Unterstützung bei den REM- und Domänenuntersuchungen.

Herrn Frohmader und Herrn Roßmanith schulde ich Dank für die hilfreichen Diskussionen während der Durchführung der Arbeit.

Weiter möchte ich den Herren Plankenbühler, Bäsig, Bauder, Pelz, Wadehn und der Frau Friedmann und allen anderen Mitarbeitern des Lehrstuhls, die direkt oder indirekt an dieser Arbeit teilhatten, danken.

B Literaturverzeichnis

- /1/ A. S. Hoagland :
Digital Magnetic Recording
Robert E. Krieger Publishing Co.
Malabar, Florida 1983

- /2/ F. Jorgensen :
The Complete Handbook of Magnetic Recording
TAB Books Nr. 1059, TAB Books Inc., 1980, USA

- /3/ Andrew A. Gaudet, Bobby J. Smith :
An Overview of the Technology in the
IBM 3370 Direct Access Storage
IBM Disk Storage Technology
February 1980, p. 1

- /4/ J. Trifari :
Thin-Film Heads Appear on 5 1/4-in. Winchesters
Mini-Micro Systems, April 1981, p. 135

- /5/ N. Bauer :
Digitale Aufzeichnung von Videosignalen auf Magnet-
band mit hoher Dichte
Dissertation an der Technischen Fakultät der
Universität Erlangen-Nürnberg, 1982

- /6/ BASF Video Cassetten, Technische Informationen
BASF Produktübersicht, Ausgabe 1984

- /7/ E. Schmidt :
Die Industrie braucht neue Absatzmärkte
VDI-Nachrichten Nr. 49, 6. Dezember 1985, S. 14

- /8/ Handbuch für weichmagnetische Werkstoffe
Vacuumschmelze, Hanau, Ausgabe 1967
- /9/ C. Heck :
Magnetische Werkstoffe
Dr. A. Hüthig Verlag, Heidelberg 1975
- /10/ A. Hubert :
Magnetische Werkstoffe (Vorlesungsskriptum)
Lehrstuhl für Werkstoffe der Elektrotechnik
Universität Erlangen-Nürnberg
- /11/ Hans-Heinrich Gatzen :
Schreib-Lese-Köpfe für Magnetplattenspeicher in
konventioneller und Dünnschicht-Technologie
Feinwerktechnik und Messtechnik
Nr. 88 (1980), Heft 2, Seite 53-59
- /12/ K. H. Kotter :
Grundzüge der Videokopf-Technologie
Grundig, Technische Informationen 1/2-81, S.71
- /13/ K. E. Kuijk, W. J. van Gerstel, F. W. Gorter :
The Barber Pole, a Linear Magnetoresistive Head
IEEE Trans. on Magn., vol. MAG-11, 1975, p. 1215
- /14/ T. Sekiya, H. Uchida, J. Sugita, K. Odaka, H. Nakajuma :
Digital Audio Compact Cassette with Thin Film Head
AES-Convention, 1982, March 2-5, Montreux
- /15/ T. Sawada, T. Sakuma, K. Yoneda :
Yoke Type MR Head on Perpendicular Double Layer Media
IEEE Trans. on Magn., vol. MAG-20, Sept. 1984, p.857

- /16/ C. H. Kramp :
Magnetoresistive Sensoren
Valvo, Technische Information 840323

- /17/ W. Metzdorf, M. Boehner, H. Haudeck :
The Design of Magnetoresistive Multitrack Read Heads
for Magnetic Tapes
Invited Paper, presented at the Intermag-Conference 1981

- /18/ Bogen Electronic GmbH, Berlin
Magnetkopf BLE 224 (Datenblatt), 12/83

- /19/ J. H. J. Fluitman :
Investigation of the Structure of Recording Head Fields
IEEE Trans. on Magn., vol. MAG-15, Nov. 1979, p. 1634

- /20/ G. Planer :
Untersuchungen zur Herstellung eines magneto-
resistiven Dünnschichtmagnetkopfes
Studienarbeit am Lehrstuhl für Technische Elektronik
Universität Erlangen-Nürnberg, 1985

- /21/ E. P. Valstyn :
Integrated Head Developments
Annals of the New York Academy Science 1972, p. 191-205

- /22/ Y. Watanabe, S. Matsumoto, N. Yajima :
Fabrication of Grouped Magnetic Heads
IEEE Trans. on Magn., vol. MAG-5, Dec. 1969, p. 918

- /23/ A. D. Kaske, P. E. Oberg, M. C. Paul, G. F. Sauter :
Vapor-Deposited Thin-Film Recording Heads
IEEE Trans. on Magn., vol. MAG-7, Sept. 1971, p. 675

- /24/ G. F. Sauter, M. C. Paul, P. E. Oberg, A. D. Kaske :
Transverse Recording Using Thin-Film Recording Heads
IEEE Trans. on Magn., vol. MAG-8, June 1972, p. 194
- /25/ L. T. Romankiw, I. M. Croll, M. Hatzakis :
Batch-Fabricated Thin-Film Magnetic Recording Heads
IEEE Trans. on Magn., vol. MAG-6, Sept. 1970, p. 597
- /26/ J. P. Lazarri, I. Melnick :
Recording Integrated Magnetic Heads
IEEE Trans. on Magn., vol. MAG-6, Sept. 1970, p. 601
- /27/ J. P. Lazarri :
Integrated Magnetic Recording Heads Applications
IEEE Trans. on Magn., vol. MAG-9, Sept. 1973, p. 322
- /28/ W. Chynoweth, J. Jordan, W. Kayser :
PEDRO, a Transducer-per-Track Recording System with
Batch-Fabricated Magnetic Film Read/Write Transducers
Honeywell Computer Journal, vol. 7, no. 2, p. 103
- /29/ L. Romankiw, P. Simon :
Batch Fabrication of Thin Film Magnetic Recording Heads:
A Literature Review and Process Description for Vertical
Single Turn Heads
IEEE Trans. on Magn., vol. MAG-11, Jan. 1975, p. 50
- /30/ G. V. Kelley, J. Freeman, H. Copenhauer, R. A. Ketcham,
E. P. Valstyn :
High-Track-Density, Coupled-Film Magnetoresistive Head
IEEE Trans. on Magn., vol. MAG-17, Nov. 1981, p. 2890
- /31/ C. Kittel :
Einführung in die Festkörperphysik
Oldenbourg, München 1969

- /32/ E. Kneller :
Ferromagnetismus
Springer-Verlag, Berlin 1962
- /33/ R. Boll :
Wirbelstrom- und Spinrelaxationsverluste in dünnen
Metallbändern bei Frequenzen bis zu etwa 1 MHz
Zeitschrift für Angewandte Physik
Band XII, Heft 5, 1960, S. 212
- /34/ E. R. Katz :
Finite Element Analysis of the Vertical Multi-Turn
Thin-Film Head
IEEE Trans. on Magn., vol. MAG-14, Sept. 1978, p. 506
- /35/ R. E. Jones, Jr. :
Analysis of the Efficiency and Inductance of Multiturn
Thin-Film Magnetic Recording Heads
IEEE Trans. on Magn., vol. MAG-14, Sept. 1978, p. 509
- /36/ G. F. Forsythe, W. R. Wasow :
Finite Difference Methods for Partial Differential
Equations
Wiley, New York 1960
- /37/ A. Wexler :
Some Recent Developments in Field Calculations
IEEE Trans. on Magn., vol. MAG-15, Nov. 1979, p. 1659
- /38/ B. Höfflinger :
Großintegration
Oldenbourg, München 1978

- /39/ Philips :
Verfahren zur Herstellung eines Magnetkopfes
Offenlegungsschrift 24 58 079
Deutsches Patentamt
- /40/ The Book of Basics (2. Edition)
Materials Research Corporation
Orangeburg, New York
- /41/ S. Raith :
Automatische interferometrische Profilabtastung
Dissertation an der Technischen Fakultät der
Universität Erlangen-Nürnberg, 1975
- /42/ F. Schmidt, W. Rave, A. Hubert :
Enhancement of Magneto-Optical Domain Observation
by Digital Image Processing
IEEE Trans. on Magn., vol. MAG-21, Sept. 1985, p. 1596
- /43/ U. Tietze, C. Schenk :
Halbleiter-Schaltungstechnik
Springer-Verlag, Berlin 1985
- /44/ Lindner, Brauer, Lehmann :
Taschenbuch der Elektrotechnik und Elektronik
Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt/M. 1985
- /45/ G. Spahlinger :
Eine Näherungsformel zur Bestimmung der Induktivität
von flachen Spiralspulen
AEÜ, Band 39 (1985), Heft 1, S. 61
- /46/ D. Schieber :
On the Inductance of Printed Spiral Coils
Archiv für Elektrotechnik 68 (1985), S. 155

- /47/ F. Oehme :
Dropout-Untersuchungen an flexiblen magnetischen
Datenträgern
DFG-Vorhaben Oe 100/1-1, Kennwort: Dropouts
- /48/ G. Mocker :
Entwicklung einer Schreib-Lese-Elektronik für ein
experimentelles Plattenspeichersystem
Diplomarbeit am Lehrstuhl für Technische Elektronik
Universität Erlangen-Nürnberg, 1985
- /49/ W. K. Westimijze :
Studies on Magnetic Recording: Pt. II. Field
Configuration around the Gap and Gap-Length Formula
Philips Res. Rept., vol. 8, 1953, p. 683
- /50/ G. E. Roberts, T. A. Roscamp, P. D. Frank :
Origins of Playback Pulse Asymmetry in Recording with
Thin Film Disk Heads
IEEE Trans. on Magn., vol. MAG-17, Nov. 1981, p. 2902
- /51/ IBM Speicherwerk Mainz
Und-oder-nor+Steuerungstechnik 6/85, S. 8
- /52/ S. Iwasaki :
Perpendicular Magnetic Recording
- Evolution and Future -
IEEE Trans. on Magn., vol. MAG-20, Sept. 1984, p. 657
- /53/ K. Yamamori, R. Nishikawa, T. Asano, T. Fujiwara :
Perpendicular Magnetic Recording Performance
of Double-Layer Media
IEEE Trans. on Magn., vol. MAG-17, Nov. 1981, p. 2538

- /54/ B. J. Langland, P. A. Albert :
Recording on Perpendicular Anisotropy Media
with Ring Heads
IEEE Trans. on Magn., vol. MAG-17, Nov. 1981, p. 2547
- /55/ J. P. Lazarri, M. A. Torfeh, J. P. Tual :
Thin Film Head Study for Perpendicular Recording
IEEE Trans. on Magn., vol. MAG-17, Nov. 1981, p. 3120
- /56/ K. Kanai, N. Kaminaka, N. Nouchi, N. Nomura, E. Hirota :
High Track Density Thin-Film Tape Heads
IEEE Trans. on Magn., vol. MAG-15, July 1979, p. 1130
- /57/ W. Aures :
Untersuchungen für einen Magnetkopf zur senkrechten
Aufzeichnung
Diplomarbeit am Lehrstuhl für Technische Elektronik
Universität Erlangen-Nürnberg, 1985
- /58/ D. Seitzer :
Eine Gabelschaltung für Nanosekundenimpulse zur
Herabsetzung der Schreibstörung in einem Magnet-
schichtspeicher
AEÜ, Band 18 (1964), S. 577

9 Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

A	Kleinsignal-Spannungsverstärkung
A	Vektorpotential (A_x, A_y, A_z)
B	Induktion
B _s	Sättigungsinduktion
b _{Sp}	Spurbreite
β	Kleinsignal-Stromverstärkung
C	Kapazität
d	Dicke
E	Effektivität
f	Frequenz
f _{res}	Resonanzfrequenz
f _r	Spinrelaxationsfrequenz
f _w	Wirbelstromfrequenz
FW	Flußwechsel
H	Magnetfeld
H _c	Koerzitivfeldstärke
H _g	Magnetfeld im Spalt
H _k	Anisotropiefeldstärke
HD	High Density
h _p	Polstirnhöhe
I	Strom
K	Kristallanisotropie
L	Induktivität
l _b	Spalttiefe
l _g	Spaltlänge
λ	Längsmagnetostriktion
λ	Wellenlänge
M	Wechselinduktivität
M _r	Remanenz
MRH	Magnetoresistiver Kopf
$\bar{\mu}$	Komplexe Permeabilität ($\mu_{LR} = \text{Re}(\bar{\mu}), \mu_{RR} = \text{Im}(\bar{\mu})$)
μ _i	Relative Anfangspermeabilität
μ _r	Relative Permeabilität

μ_0	Induktionskonstante
N	Spulenwindungszahl
n	Spulenwindungszahl
n	Brechungsindex
ϕ	Magnetischer Fluß
R	Elektrischer Widerstand
$R_{..}$	Magnetischer Widerstand
RAM	Schreib-/Lesespeicher
REM	Raster-Elektronenmikroskop
RF	Hochfrequenz
$r_{..}$	Differentieller Widerstand
ϱ	Dichte
ϱ	Spezifischer elektrischer Widerstand
S	Kleinsignal-Steilheit
s	Rechteckigkeit der Hysteresekurve
T	Transistor
$T_{..}$	Curie-Temperatur
T_c	Curie-Temperatur
U	Spannung
$\omega_{..}$	Kreisfrequenz
Z	Komplexer Widerstand (Impedanz)

10 Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

Abb. 2-1:	Schema der Signalübertragung	3
Abb. 2-2:	Ringspule	6
Abb. 2-3:	Karlquist-Feld	7
Abb. 2-4:	Einwindungsköpfe in Dünnschichttechnik (horizontal und vertikal)	12
Abb. 2-5:	Vertikaler Dünnschichtkopf (Mehrwindungskopf mit "gestapelter" Spule)	12
Abb. 2-6:	Vertikaler Dünnschichtkopf (Mehrwindungskopf mit Flachspule)	13
Abb. 3-1:	Schematischer Querschnitt durch einen Dünnschichtkopf mit Flachspule	20
Abb. 3-2:	Magnetischer Fluß ϕ im Dünnschichtkopf	22
Abb. 3-3:	Wirbelstromabhängigkeit der relativen Perme- abilität μ_r bei Mumetall für ver- schiedene Anfangspermeabilitäten μ_i	26
Abb. 3-4:	Änderung der relativen Permeabilität μ_r bei Mumetall infolge Spinrelaxation für ver- schiedene Anfangspermeabilitäten μ_i	26
Abb. 3-5:	Änderung der relativen Permeabilität μ_r infolge Spinrelaxation und Wirbelströmen bei Mumetall für verschiedene Anfangsperme- abilitäten μ_i	27
Abb. 3-6:	Änderung der relativen Permeabilität μ_r infolge Spinrelaxation und Wirbelströmen bei verschiedenen Magnetjochmaterialien	27
Abb. 3-7:	Einfaches magnetisches Ersatzschaltbild für einen Dünnschichtkopf	32
Abb. 3-8:	"Jones"-Kopf	35
Abb. 3-9:	"Realer" Dünnschichtkopf mit 12 Windungen	35
Abb. 3-10a:	Abhängigkeit der Kopfeffektivität von der rel. Permeabilität μ_r	37
Abb. 3-10b:	Abhängigkeit der Kopfeffektivität von der Jochdicke t	37

Abb. 3-10c:	Abhängigkeit der Kopfeffektivität vom Jochabstand g_a	38
Abb. 3-11a:	Abhängigkeit der Kopfinduktivität von der rel. Permeabilität μ_r	40
Abb. 3-11b:	Abhängigkeit der Kopfinduktivität von der Jochdicke t	40
Abb. 3-11c:	Abhängigkeit der Kopfinduktivität vom Jochabstand g_a	41
Abb. 3-12:	Designregeln a) innerhalb einer Maske und b) zwischen zwei Masken	43
Abb. 3-13:	Schematischer Ablauf bei der Schichtenstrukturierung (Fototechnik und Ätzung)	45
Abb. 3-14:	Dünnschichtkopferstellung	46
Abb. 3-15:	Vorderansicht des ungeschliffenen Filmkopfes mit den verschiedenen Bearbeitungshilfen in perspektivischer Darstellung	49
Abb. 3-16:	Verschaltung der elektrischen Bearbeitungshilfen	50
Abb. 4-1:	Die abgesprungene Mumetallschicht hat aus dem Siliziumsubstrat Scheibenoberflächenteile herausgerissen	54
Abb. 4-2:	Querschnitt durch das DC/RF-SPUTRON von Balzers	57
Abb. 4-3:	Schräg geätzte Mumetallkanten	58
Abb. 4-4:	Einfluß der Substrattemperatur und des Argondruckes auf die Mikrostruktur gesputterter Schichten	62
Abb. 4-5:	Unterbrechung des oberen Magnetjoches bei Verwendung des HTR-Polyimidlackes	65
Abb. 4-6:	Schräge Kanten beim PIQ-Polyimidlack	65
Abb. 4-7:	Durchgehendes Joch bei Verwendung von PIQ-Lack	66
Abb. 4-8:	Komplette Schichtfolge für den Dünnschichtkopf	68

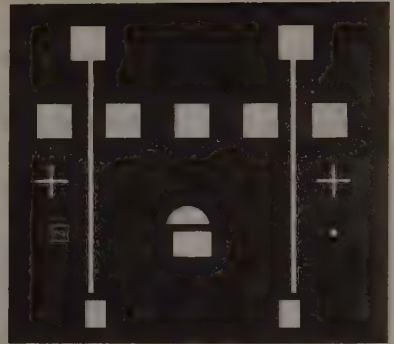
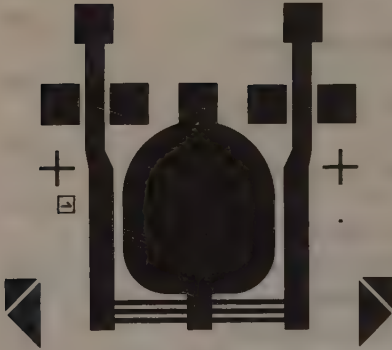
Abb. 4-9:	Schematische Darstellung der Übertragung der Leiterbahn-Höhenstruktur auf das obere Magnetjoch	69
Abb. 4-10:	Querschnitt durch den Magnetkopf	70
Abb. 4-11:	Mikroskopaufnahme des Dünnfilmkopfes	70
Abb. 4-12:	Oxiddickenmessung	73
Abb. 4-13:	Meßdiagramm (Interferenzen) einer ca. 1 μm dicken SiO_2 -Schicht auf Silizium	75
Abb. 4-14:	Schematischer Aufbau eines Michelson-Zweistrahlinteferometers	75
Abb. 4-15:	Zweistrahlinteferenz bei einer strukturierten Kupferschicht	77
Abb. 4-16:	Meßdiagramm einer ca. 2,5 μm dicken strukturierten Kupferschicht, aufgenommen mit dem "Optischen Profiltaster"	77
Abb. 4-17:	Prinzipaufbau des "Loop-Tracers"	80
Abb. 4-18a:	Hystereseschleife einer ca. 3,5 μm dicken Mumetallschicht in leichter Richtung	81
Abb. 4-18b:	Hystereseschleife einer ca. 3,5 μm dicken Mumetallschicht in schwerer Richtung	81
Abb. 4-19:	Domänenstrukturen im oberen Magnetjoch (Mumetall), sichtbar gemacht mit Hilfe des magnetooptischen Kerr-Effektes	82
Abb. 4-20:	Kopfschleifenergebnisse bei der Polspiegelbearbeitung	87
Abb. 4-21:	Mikroskopaufnahme des geschliffenen Polspiegels	87
Abb. 5-1:	Einfaches elektrisches Ersatzschaltbild für einen Magnetkopf	91
Abb. 5-2:	Emittergekoppelter Oszillator	93
Abb. 5-3:	Oszillatormeßschaltung zur Bestimmung der Kopffresonanzfrequenz	93
Abb. 5-4a:	Aus der Resonanzfrequenz bestimmte Kopfinduktivität	94

Abb. 5-4b:	Aus der Resonanzfrequenz bestimmte Kopfkapazität	94
Abb. 5-5:	Infinitesimal dünner Stabmagnet der Länge dx und der Breite dy im Ursprung	97
Abb. 5-6:	Meßschaltung zur Bestimmung der induzierten Spannung im Lesekopf	101
Abb. 5-7:	Frequenzabhängigkeit der induzierten Lesespannung bei verschiedenen Kopfabständen d	102
Abb. 5-8a:	Abfall der Induktionsspannung mit steigenden Kopfabständen	103
Abb. 5-8b:	Einfluß des seitlichen Kopfversatzes auf die Induktionsspannung bei verschiedenen Kopfabständen Δx	103
Abb. 5-9:	Schreib- und Lesespule in der $r-\psi$ -Ebene	104
Abb. 5-10:	Aufbau des Meßsystems mit dem experimentellen Diskettenlaufwerk	107
Abb. 5-11:	Lesesignal bei verschiedenen Aufzeichnungsfrequenzen und Diskettenumdrehungszahlen	109
Abb. 5-12:	Lesesignal bei verschiedenen Aufzeichnungsfrequenzen und Schreibströmen	111
Abb. 5-13:	Lesesignal bei der Standard- und der HD-Diskette für verschiedene Aufzeichnungsfrequenzen	111
Abb. 5-14:	Lesesignal in Abhängigkeit vom Schreibstrom bei verschiedenen Frequenzen	112
Abb. 5-15:	Einfluß des Schreibstromes auf das Lesesignal bei verschiedenen Aufzeichnungsdichten	113
Abb. 5-16:	Einfluß der Diskettenwahl auf das Lesesignal	113
Abb. 5-17:	Einfluß der Wahl des Schreibstromes auf das Lesesignal	114
Abb. 5-18:	Einfluß der longitudinalen und Vektormagnetisierung auf die Pulsform des Lesesignals	115
Abb. 5-19:	Die vier betrachteten Fälle beim Schreiben und Lesen bzgl. der Kopfposition gegenüber dem Medium	117

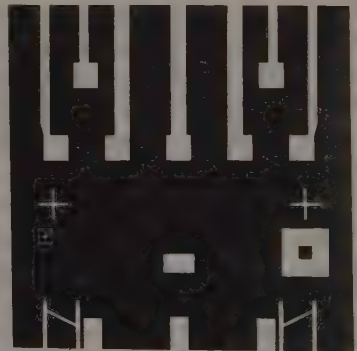
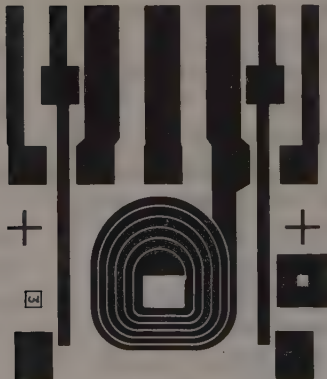
Abb. 5-20a:	Symmetrisches Lesesignal (Fall 1)	118
Abb. 5-20b:	Asymmetrisches Lesesignal (Fall 2)	118
Abb. 5-20c:	Asymmetrisches Lesesignal (Fall 3)	119
Abb. 5-20d:	Symmetrisches Lesesignal (Fall 4)	119
Abb. 5-21a:	Lesesignal bei 500 Flußwechsel pro Millimeter	122
Abb. 5-21b:	Lesesignal bei 1000 Flußwechsel pro Millimeter	122
Abb. 5-21c:	Lesesignal bei 2000 Flußwechsel pro Millimeter	123
Abb. 5-21d:	Lesesignal bei 3000 Flußwechsel pro Millimeter	123
Abb. 5-22:	Lesesignal bei Kopf-Fehlpositionierung bzgl. der Schreibspur ("Rasen")	124
Abb. 6-1:	Entwicklung der Flächenspeicherdichte am Beispiel der IBM-Plattenspeicher	127
Abb. 6-2:	Entwicklung der Aufzeichnungsdichte seit 1975 für flexible Disk-Systeme bei der Senkrechtaufzeichnung	132
Abb. 6-3:	Abhängigkeit der Lesespannung von der Aufzeichnungswellenlänge mit dem Band- Kopf-Abstand als Parameter	134
Abb. 6-4:	Verschiedene Köpfe, die für Senkrecht- aufzeichnung geeignet sind	135
Abb. 6-5:	Mögliche Dünnfilmkopfkombination für einen Schreib-/Lesekopf zur Senkrechtaufzeichnung	138
Abb. 6-6:	Dünnfilmmagnetkopf mit integriertem Lese- vorverstärker und Entkopplungselementen	141
Abb. 6-7a:	Ersatzschaltbild für den Lesevorgang	143
Abb. 6-7b:	Ersatzschaltbild für den Schreibvorgang	144
Tabelle 1:	Zeitaufwand für die Dünnschichtprozesse	72
Tabelle 2:	Ergebnisse der energiedispersiven quanti- tativen Röntgenanalyse im Rasterelektro- nenmikroskop	79
Tabelle 3:	Eigenschaften von Partikelmedien	130

11 Anhang

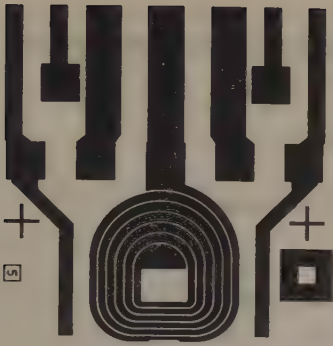
11.1 Maskensatz für den Dünnfilmkopf



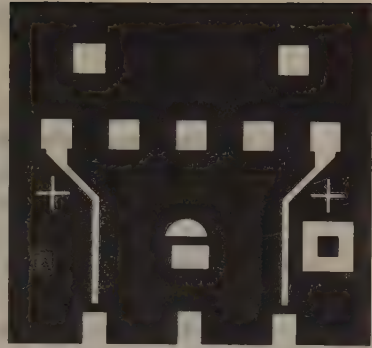
Maske 1 (unteres Magnetjoch) Maske 2
(unteres Magnetjoch) (Spaltfüllung)



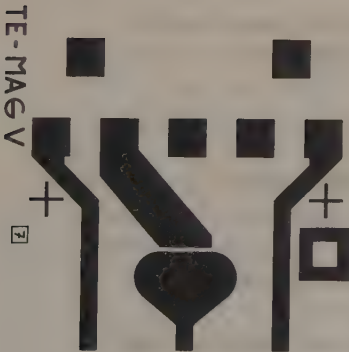
Maske 3 Maske 4
(untere Spiralspule) (Spulenisolation)



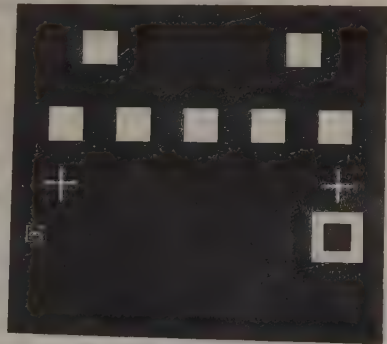
Maske 5
(obere Spiralspule)



Maske 6
(Spule/Joch-Isolation)



Maske 7
(oberes Magnetjoch)



Maske 8
(Schutzisolation)

(Bemerkung: An den schwarzen Stellen bleibt das Material beim Ätzen stehen, an den weißen wird es weggeätzt)

11.2 Dünnschicht-Herstellungsprogramm für den Magnetkopf

- 1) Scheibenreinigung und -oxidation
 - a) Scheibengrundreinigung
 - b) Thermische Oxidation der Silizium-Scheiben
Oxiddicke: ca. 1 μm
- 2) Herstellung des unteren Magnetjoches
 - a) Mumetall-Sputtern
DC-Sputtern im Sputron; Dicke: ca. 3,5 μm
 - b) Titan-Sputtern
DC-Sputtern im Sputron; Dicke: ca. 50 nm
- 3) Strukturierung des unteren Magnetjoches
 - a) Fototechnik
Positivlack; Belichtung mit Maske MAG V/1
 - b) Ätzen der Mumetall-/Titan-Schicht
 - c) Fotolackentfernung
 - d) Titanentfernung
- 4) Aluminiumoxid-Sputtern (Spaltfüllung)
RF-Sputtern im Sputron; Oxiddicke: ca. 500 nm
- 5) Strukturierung der Aluminiumoxidschicht
 - a) Fototechnik
Positivlack; Belichtung mit Maske MAG V/2
 - b) Aluminiumoxid-Ionenstrahlätzen
 - c) Fotolackentfernung
- 6) Herstellung der unteren Spiralspule
 - a) Chrom-Sputtern
DC-Sputtern im Sputron; Dicke: ca. 10 nm

- b) Kupfer-Bedampfung
Verdampfung mittels Elektronenstrahlkanone;
Dicke: ca. 2,5 μm
 - c) Titan-Sputtern
DC-Sputtern im Sputron; Dicke: ca. 30 nm
- 7) Strukturierung der unteren Spiralspule
- a) Fototechnik
Positivlack; Belichtung mit Maske MAG V/3
 - b) Titan-/Kupfer-/Chrom-Ionenstrahlätzen
 - c) Fotolackentfernung
- 8) PIQ-Lacktechnik
Belacken; Vor- und Nachhärten
- 9) PIQ-Strukturierung
- a) Fototechnik
Negativlack; Belichtung mit Maske MAG V/4
 - b) PIQ-Lackätzung
Ätzmittel: PIQ-Etchant
 - c) Negativlackentfernung
- 10) Titan-Ionenstrahlätzen
- 11) Herstellung der oberen Spiralspule
- a) Chrom-Sputtern
DC-Sputtern im Sputron; Dicke: ca. 10 nm
 - b) Kupfer-Bedampfung
Verdampfung mittels Elektronenstrahlkanone;
Dicke: ca. 2,5 μm
 - c) Titan-Sputtern
DC-Sputtern im Sputron; Dicke: ca. 30 nm

- 12) Strukturierung der oberen Spiralspule
 - a) Fototechnik
Positivlack; Belichtung mit Maske MAG V/5
 - b) Titan-/Kupfer-/Chrom-Ionenstrahlätzen
 - c) Fotolackentfernung
- 13) PIQ-Lacktechnik
Belacken; Vor- und Nachhärten
- 14) PIQ-Strukturierung
 - a) Fototechnik
Negativlack; Belichtung mit Maske MAG V/6
 - b) PIQ-Lackätzung
Ätzmittel: PIQ-Etchant
 - c) Negativlackentfernung
- 15) Herstellung des oberen Magnetjoches
 - a) Mumetall-Sputtern
DC-Sputtern im Sputron; Dicke: ca. 3,5 μ m
 - b) Titan-Sputtern
DC-Sputtern im Sputron; Dicke: ca. 50 nm
- 16) Strukturierung des oberen Magnetjoches
 - a) Fototechnik
Positivlack; Belichtung mit Maske MAG V/7
 - b) Titan-/Mumetall-Ionenstrahlätzen
 - c) Fotolackentfernung
- 17) PIQ-Lacktechnik
Belacken; Vor- und Nachhärten
- 18) PIQ-Strukturierung
 - a) Fototechnik
Negativlack; Belichtung mit Maske MAG V/8

b) PIQ-Lackätzung

Ätzmittel: PIQ-Etchant

c) Fotolackentfernung

19) Titan-Ionenstrahlätzen

11.3 Magnetkopfdaten

a) Geometrische Daten:

Windungszahl	2 x 6
Spaltlänge	ca. 0,5 μm
Spurbreite	50 μm
Polstirnhöhe	ca. 7,5 μm
Magnetjochdicke	ca. 3,5 μm
Leiterbahndicke	ca. 2,5 μm
Flächenbedarf	ca. 1,2 mm x 1,2 mm

b) Elektrische Daten:

Widerstand	ca. 8 Ω
Induktivität	ca. 160 nH
Kapazität	ca. 3 pF
Resonanzfrequenz	> 120 MHz
Lesespannung	bis zu 100 μV
Optimaler Schreibstrom	15 - 100 mA
(je nach Aufzeichnungsdichte)	

Lebenslauf

12. 10. 1950 Geboren in Bielefeld
Eltern: Dipl.-Ing. Kurt Kollmann
 Hildegard Kollmann, geb. Ludewig
- 1957 - 1961 Besuch der Volksschule an der Grimmstraße
 in Nürnberg
- 1961 - 1970 Besuch des Realgymnasiums (Willstätter-
 Gymnasium) in Nürnberg
Abschluß: Abitur
- 1970 - 1976 Physikstudium an der Universität
 Erlangen-Nürnberg
Abschluß: Diplom
- 1977 - 1979 Wissenschaftliche Hilfskraft am Lehrstuhl
 für Technische Elektronik der Universität
 Erlangen-Nürnberg
- seit 1979 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl
 für Technische Elektronik der Universität
 Erlangen-Nürnberg

Erlangen, April 1986

Jürgen Kollmann

